

装备器材保障网络设计与优化

王荣辉 梁 波 金丽亚 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

装备器材保障作为装备保障工作的重要组成部分,担负着为我军各类装备维修保障提供物质基础、为装备恢复战斗能力创造条件的重任。因此,将抗毁性贯穿网络的设计阶段,探讨和研究满足一定抗毁性要求的装备器材保障网络设计与优化方法,是非常有意义的。本书在深入分析和总结现行保障模式特点的基础上,以构建适应未来一体化联合作战的装备器材保障模式为牵引,基于区域物流理论提出了装备器材保障模式,并在此基础上研究了保障网络设计的关键技术、抗毁性度量方法及业务层抗毁性优化。

本书可作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生的参考书,也可供从事装备保障领域的科研人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

装备器材保障网络设计与优化 / 王荣辉, 梁波, 金丽亚著. —北京: 电子工业出版社, 2018.8

ISBN 978-7-121-35156-3

I. ①装… II. ①王… ②梁… ③金… III. ①武器装备管理—研究 IV. ①E145.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 228190 号

责任编辑: 王晓庆

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 10 字数: 256 千字

版 次: 2018 年 8 月第 1 版

印 次: 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254113, wangxq@phei.com.cn。

前 言

装备器材保障作为装备保障工作的重要组成部分，担负着为我军各类装备维修保障提供物质基础、为装备恢复战斗能力创造条件的重任。一方面，我军虽然在装备器材保障的应用研究方面做出了一定的成效，基本形成了一个“纵向一体化”的装备器材保障模式，但是现行的装备器材保障模式不能完全满足迅捷、优质、高效、低耗、柔性保障的要求，不能很好地适应信息化装备维修保障的需要。另一方面，信息化战争对后勤与装备保障的依赖性空前增大，交战双方都把打击破坏敌方装备保障力量作为达成战争目的的基本手段之一。装备器材保障的生存已成为一个非常突出的问题，因此，将抗毁性贯穿网络的设计阶段，探讨和研究满足一定抗毁性要求的装备器材保障网络设计与优化方法，是非常有意义的。

本书以装备器材保障为具体研究对象，按照“保障模式研究—保障网络设计—网络抗毁性分析—网络抗毁性优化”的思路开展研究。

本书共 6 章。第 1 章主要包括研究背景、研究意义、相关研究现状，以及研究思路、内容及结构等内容。第 2 章主要包括相关概念、现行装备器材保障模式分析、基于区域保障的装备器材保障模式构建、基于区域保障模式的装备器材保障网络分析等内容。第 3 章主要包括装备器材保障网络设计关键技术分析、基于群决策的候选保障中心选址决策、基于双层混合整数规划的保障中心选址决策、保障中心选址算例等内容。第 4 章主要包括装备器材保障网络抗毁性测度建立原则及研究框架、装备器材保障网络抗毁性测度、装备器材保障网络抗毁性仿真实验等内容。第 5 章主要包括业务层中断恢复问题分析、业务层中断恢复模型构建、业务层中断恢复模型求解算法设计、装备器材保障网络业务层中断恢复算例等内容。第 6 章总结主要完成的工作，分析创新点，对未来工作进行展望。

本书由王荣辉、梁波、金丽亚著。书中不免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2018 年 8 月

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究意义	2
1.3	相关研究现状	3
1.3.1	区域物流理论与实践研究	3
1.3.2	选址问题	9
1.3.3	网络抗毁性	12
1.3.4	干扰管理理论与方法	18
1.3.5	文献总结	22
1.4	研究思路、内容及结构	24
第 2 章	装备器材保障模式	27
2.1	相关概念	27
2.2	现行装备器材保障模式分析	29
2.2.1	现行装备器材保障模式的特点	29
2.2.2	现行装备器材保障模式的不足	30
2.3	基于区域保障的装备器材保障模式构建	32
2.3.1	保障模式构建原则	32
2.3.2	保障模式总体结构	33
2.3.3	组织机构及其职能	35
2.3.4	保障模式中的业务处理	37
2.3.5	保障模式中的信息处理	41
2.3.6	保障模式的特点分析	45
2.3.7	区域保障模式实施策略	46
2.4	基于区域保障模式的装备器材保障网络分析	46
2.4.1	装备器材保障网络的构成及特点	47
2.4.2	装备器材保障网络的网络模型	49
2.4.3	装备器材保障网络的设计要求	53
2.5	本章小结	54
第 3 章	装备器材保障网络设计关键技术	55
3.1	装备器材保障网络设计关键技术分析	55

3.1.1	研究对象分析	55
3.1.2	研究问题分解	56
3.1.3	研究总体思路	56
3.2	基于群决策的候选保障中心选址决策	58
3.2.1	候选保障中心选址评价指标体系	58
3.2.2	语言型多指标群决策问题	60
3.2.3	候选保障中心选址的二元语义群决策	64
3.3	基于双层混合整数规划的保障中心选址决策	71
3.3.1	模型建立	71
3.3.2	模型求解算法设计	76
3.4	保障中心选址算例	83
3.4.1	实验数据	83
3.4.2	初选阶段	83
3.4.3	终选阶段	86
3.5	本章小结	90
第 4 章	装备器材保障网络抗毁性度量方法	91
4.1	装备器材保障网络抗毁性测度建立原则及研究框架	91
4.1.1	抗毁性测度建立原则	91
4.1.2	抗毁性测度研究框架	92
4.2	装备器材保障网络抗毁性测度	93
4.2.1	网络物理层抗毁性测度	94
4.2.2	网络业务层抗毁性测度	95
4.2.3	计算抗毁性测度的关键算法设计	96
4.3	装备器材保障网络抗毁性仿真实验	100
4.3.1	仿真实验数据环境	100
4.3.2	攻击策略	103
4.3.3	网络抗毁性仿真实验	105
4.3.4	装备器材保障网络抗毁性结论	109
4.4	本章小结	109
第 5 章	装备器材保障网络抗毁性优化	111
5.1	业务层中断恢复问题分析	111
5.1.1	救援策略的概念	111
5.1.2	业务层中断问题描述	113
5.1.3	业务层中断恢复策略确定原则	115
5.1.4	业务层中断施救决策过程	116

5.2	业务层中断恢复模型构建	117
5.2.1	目标函数分析	117
5.2.2	模型假设及变量定义	119
5.2.3	模型构建	121
5.3	业务层中断恢复模型求解算法设计	122
5.3.1	改进的非支配排序遗传算法	122
5.3.2	算法执行流程	128
5.3.3	算法复杂度分析	129
5.4	装备器材保障网络业务层中断恢复算例	129
5.4.1	实验数据	129
5.4.2	恢复策略确定	131
5.4.3	实验结果	132
5.4.4	中断恢复后的业务层抗毁性	132
5.5	本章小结	135
第 6 章	结论与展望	136
6.1	主要完成的工作	136
6.2	创新点	137
6.3	展望	138
附录	候选保障中心初选数据	139
参考文献		143

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

现代高技术战争对后勤与装备保障的依赖性空前增大，交战双方都把打击破坏敌方后勤与装备保障力量作为达成战争目的的基本手段之一，后勤与装备保障生存已成为一个非常突出的问题^[1]。美国陆军 1993 年《作战纲要》明确提出：“摧毁敌方支援系统，并保护己方支援系统，是战役和战役性作战的重要方面。”在海湾战争中，多国部队对伊拉克战略后方和后勤保障系统进行了大规模的摧毁性打击，使伊拉克军队的物资器材补给能力降低 90%以上，战斗力受到了极其严重的削弱。随着高技术武器系统和现代化侦察手段的不断发展，装备保障防卫的要求越来越高，各国比以往更加重视装备保障生存防卫的规划与研究，强调把装备保障生存防卫纳入整个作战防卫体系，组织专门力量实施立体防卫、合成抗击，加强重点防卫，实施有效的装备保障隐蔽伪装，提高装备保障的生存防卫能力。一些国家正加紧健全全方位、立体化和整体化的安全防卫体系，如美军建立了后方地域作战指挥中心，组织训练有素和装备精良的部队承担后方防卫任务，法军新编步兵师编设指挥与后勤团，负责全师的通信联络、后勤保障和后勤防卫。一些国家针对现代战争面临的艰巨防卫任务，还在条令中规定后勤与装备保障部队应具备在必要时同战斗部队一起作战的能力^[2]。在未来战争中，作战双方在战略战术运用上将更加重视破坏敌方的保障系统、保护己方的保障系统。我国军事物流学创始人王宗喜教授也曾强调：军事物流资源配置要具有战略性、前瞻性，要服从未来战争的实际^[3]。另外，国外学者 Lawrence V S 和 Mark S D 在研究企业供应链时发现，考虑设施失效的供应链设计方案能够明显改善在供应链中断时设施的服务效果^[4,5]。由此可见，装备保障网络在设计阶段应当充分考虑在未来战争中应对网络失效的能力，研究装备保障网络的抗毁性，提高装备保障网络在应急条件下的生存能力，成为新军事时期的重要课题。

在深化“两成两力”建设过程中，提出了“军民融合、平战结合、专业组合、资源整合；任务统筹、力量统用、手段统建、装备统管”的总体思路，简称“四合四统”^[6]。“四合四统”在保障模式上要求实现由条块分割、相对分散向综合化、区域化、一体化

转变,促进“管、修、筹、供、训”融合互动;在保障能力建设上要求实现由相对单一向多样化转变,以促进完成多样化军事任务的装备保障能力的形成;在保障管理模式上要求实现由粗放式管理向精细化管理转变,以促进装备保障管理效益的全面提升。“四合四统”与联合作战装备一体化综合保障能力建设均强调统筹保障资源,形成体系保障能力,二者在目的上具有一致性。从某种意义上讲,立足我军装备建设实际,积极走“四合四统”的路子,已成为当前推进联合作战装备一体化综合保障能力建设的一条重要途径。因此,加强装备一体化综合保障能力建设,要进一步走装备“四合四统”的路子,不断推动装备保障实现“四个转变”:以系统集成为中心,促进装备保障由各专业自成体系向综合保障转变;以体制创新为动力,促进装备保障由军队自主保障向军民一体化保障转变;以作战需求为牵引,促进装备保障由注重平时向平战结合转变;以资源整合为重点,促进装备保障由分散建设向集约建设转变。

由以上分析可以得出两点结论。一是装备保障力量生存性在现代战争中日益凸显,得到了世界各军事强国的普遍关注。提高装备保障生存能力,一方面需要在战时加强装备保障防卫力量,另一方面需要在装备保障网络的设计阶段就考虑网络抗毁性要求,将抗毁性作为保障网络的设计属性。二是综合集成是未来装备保障建设的基本趋势。提高装备保障能力,必须在保障机制与保障模式上寻求提升装备保障能力的新途径。本书基于以上背景,以装备器材保障为研究对象,以“四合四统”为基本思想,以构建适应未来一体化联合作战要求的装备器材保障网络为根本目的,以区域物流理论、选址理论、网络抗毁性理论、干扰管理理论为方法与理论支撑,探讨装备器材保障模式,研究装备器材保障网络设计、抗毁性度量与优化方法。

1.2 研究意义

本书结合装备器材保障的特点,对装备器材保障网络的设计与优化问题进行深入研究,研究的意义体现在以下三方面。

(1) 探索适应未来一体化联合作战样式的装备器材保障新模式。装备器材保障是陆军军械装备器材保障、装甲装备器材保障、车船装备器材保障、工化装备器材保障的统称,我军现阶段实行的是各专业独立运行的保障模式,这种保障模式具有专业间缺乏合作协调机制、应急条件下器材集结效率不高等缺点。从近几年相关部门主导的一系列改革活动可以看出,“四合四统”是装备器材保障发展的必然趋势。本书的研究意义之一就是“以四合四统”为基本思想,探索如何构建适应未来一体化联合作战样式的装备器材保障新模式。

(2) 探讨构建具备一定抗毁性要求的装备器材保障网络设计方法。在计算机通信领域,设计计算机通信网络时通常都要考虑网络的抗毁性指标,通过链路备份或节点备份的方法提高通信网络应对通信中断的能力^[7];在物流网络设计中,通常将网络运行成本作为物流网络设计首要考虑的因素,但也有部分文献在设计阶段考虑了抗毁性要求^[8,9]。装备器材保障网络由于其军事特性,在设计阶段考虑抗毁性指标具有明显的军事意义,然而,从这个角度系统地研究装备器材保障网络设计与优化方法的文献并不多。因此,本书的另一个研究意义就是以装备器材保障网络为研究对象,探讨构建具有一定抗毁性要求的装备器材保障网络的设计方法,丰富和完善网络,特别是网络抗毁性理论在军事器材保障网络设计中的应用。

(3) 为更广范围的装备保障问题研究提供有益的借鉴。装备器材保障仅仅是装备保障的一部分内容,研究如何构建适应未来战争的装备保障网络是本书研究的初衷。为了便于研究,本书仅选取了装备器材保障作为研究对象。即便如此,本书研究的内容对于更广范围的装备保障问题的研究,具有很好的借鉴意义。

1.3 相关研究现状

1.3.1 区域物流理论与实践研究

1. 区域物流理论和模型

关于区域物流的概念,在笔者查阅的文献中^[10~15]均采用了如下定义:区域物流是在一定的区域地理环境中,以大中型城市为中心,以区域经济规模和范围为基础,结合物流辐射的有效范围,将区域内的各类物品从供应地向接收地进行有效的实体流动,它实现了物资的空间效用、时间效用和形质效用,是运输、存储、装卸、包装、流通加工、配送、信息处理等几种功能的有机结合体。

物流的研究层面可以概括为企业层面、供应链层面、区域层面、国家层面、国际层面^[16],如图 1.1 所示。由此可见,区域物流在物流领域中属于中观物流的范畴,即从整体的角度研究区域物流资源的整合、配置和利用等问题。

目前,物流比较发达的美国、日本和欧洲在物流领域的研究侧重于企业层面,即研究作为经济活动的物流与企业的关系、作为企业利润源泉工具的物流对于企业的战略意义。实证研究多于规范研究,即通过研究与实际结合的方式为企业提供优化策略。这一层面上与区域物流相关的研究往往利用数量化的技术工具,多从跨国公司的角度

研究物流基础设施、市场竞争机制及物流供应链运行等问题（如网络设施选址定位问题、多工厂协调问题、战略配送体系设计等）。而较为宏观的区域物流研究则关注区域商业分布、工作能力、法律协调和文化合作等问题^[17]。

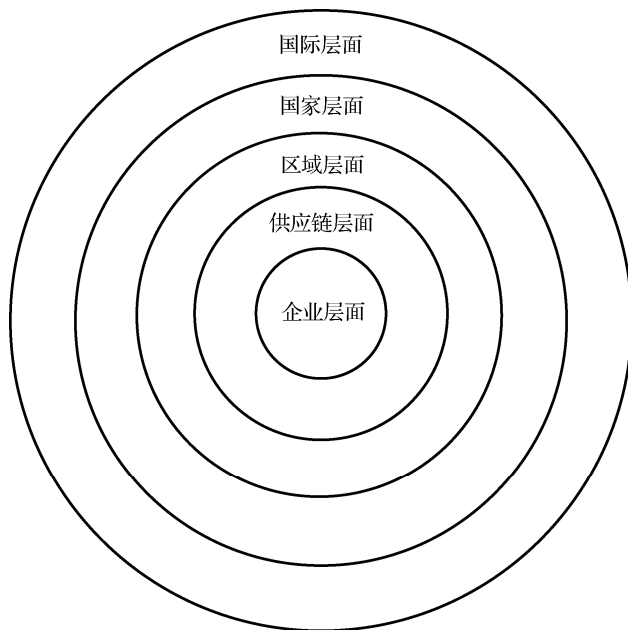


图 1.1 物流的研究层面

James L Asher^[18]将区域货运模型应用于区域网络的规划。区域货运模型包括产生、吸引和分布两个步骤，虽然可以用于预测区域内各小区发生、吸引的货运量及在各小区之间的分布，但将区域货运模型作为区域物流规划的理论模型有着很大的局限性。Donald J Bowersox^[19]针对柏林市勃兰登堡区域的经济变化而出现的交通货运等物流问题，提出通过政策和计划来进行战略性的调整。Eseobedo^[20]在对智利首都圣地亚哥周边区域经济研究的基础上，通过对价值链的分析，提出了以产品价值的流向来指导区域物流规划。Fisher^[21]将区域物流系统规划分为网络规划和节点规划两部分。其中，网络规划沿用传统的运输规划程序的思想；节点规划则根据节点功能的不同，划分为生产型配送、消费型配送和运输转运三类进行选址研究与规划。Ackermann^[22]通过分析非等级区域生产网络模型，认为目前企业间的合作与解散已经影响了物流产业的网络结构。基于此，他认为区域物流应该基于一个三层结构模型来规划，这三个层次包括需求流程、运输计划平台和物流基础设施，他认为这三层结构模型将会避免市场变化而造成的物流资源不足或浪费等问题。P H Ketikidis^[23]通过应用物流供应链管理的信息系统来调查城市区域物流发展现状和预测未来发展趋势。

我国对物流的研究最早从日本引入,起步较晚,与西方国家相比,无论在理论研究,还是在实践方面都相对落后。区域物流研究普遍侧重于宏观物流对国民经济和区域经济发展的重要意义性研究,这主要是由于国内流通领域的行业和部门分割影响了中低层次(区域物流、企业物流)的研究,缺乏中低层次物流研究的必要实践环境。

李春海、谬立新^[24]认为,物流规划理论的研究在国际上是一个非常活跃的领域,但是在我国的发展还相当缓慢,至今还没有形成统一的、可操作的方法体系,所以目前国内缺少制定宏观物流政策的理论依据,比如物流网络和物流节点(物流园区、码头等)的选址与优化、区域物流发展所需的各类设施的数量及其容量的确定、物流园区内部的功能设置等。他们提出了一个物流系统规划的总体框架,该框架按规划层次可分为3个模块:网络规划设计、物流园规划和微观仿真评价。他们还认为,应该加强物流规划理论、物流用地和现地规划研究,其中,建立一套符合我国国情的科学的物流规划方法体系是我国物流发展的当务之急。

汪波、杨天剑、赵艳彬^[25]对区域物流发展水平的综合评价进行了研究,指出区域物流是指一个地区范围或一个区域范围的货物运输、保管、包装、装卸及相关的信息传递活动,它是区域经济核心竞争力的组成部分,也是经济发展水平的重要标志。他们从区域物流合理化准则、物流子系统效率及服务水平准则和外部环境指标三大方面建立了区域物流发展水平的评估指标体系。这项研究具有一定的现实意义,可以据此评估区域物流发展水平所处的阶段。

张永、李旭宏、毛海军^[26]建立了一个区域物流基础设施平台规划框架。他们认为在区域物流规划中缺乏对区域物流基础网络规划的理论指导,更缺乏一套比较系统、科学的规划方法。这使得物流园区和物流中心在数量、规模与功能定位的确定上十分困难,很容易导致规划建设不当造成大量的物流资源浪费等问题。鉴于此,他们建立了一个基于增长机理的区域物流基础规划平台,将物流节点划分为三个层次:物流园区层、物流中心层、基础层。将物流通道划分为三个层次:主干通道、次干通道、支通道。这项研究为区域物流规划提供了方法论支撑和有益的指导。

另外,谈贵军等^[27]在国家社会物流综合费用核算体系的基础上,提出了一种区域社会物流总费用的统计方法;张义龙^[28]利用最优化概念建立区域物流分析的新方法,并设计了基于系统集成方法的各物流子系统的网络模型;王岳峰、刘伟^[29]提出了区域物流能力柔性规划的概念,对区域物流能力柔性规划的内涵进行了阐述,并在此基础上讨论了区域物流能力柔性规划的特点,构建了区域物流能力柔性规划的概念模型。

我国从 20 世纪 80 年代才开始从日本引进物流技术，不论是从理论还是从实践的角度，都与日本、美国、欧洲等物流发达国家和地区有相当大的差距。伴随市场经济的不断改革和发展，以及市场流通能力的不断增强，区域物流必然成为支撑市场流通的重要手段。

2. 区域物流理论在军事物流网络设计中的应用

王宗喜教授是我军军事物流的倡导者，王教授认为：军事物资经采集、运输、包装、加工（生产）、仓储、供应等环节，最终抵达部队（用户）而被消耗，从而实现其空间（或者与归属一并）转移的全过程，称为军事物流^[30]。军事物流作为物流的一个分支，在部队装备器材保障、后勤物资供应等方面提供了非常重要的理论支撑和方法指导。结合部队的军事特点，恰当运用先进的物流理论和技术手段，能够极大地提高装备保障军事效益，促进部队战斗力的提升。

目前，国内许多学者应用先进的区域物流理论对军事物资供应进行了研究，提出了一些很好的、可供借鉴的军事物资保障模式，为区域物流理论在军事物流中的应用研究做出了重要贡献。

蒋宁、王丰、王进^[31]分析了我军军事物流配送保障的内涵及特点，从物资储备、配送中心的构建、配送模式等方面对我军发展军事物流配送进行了探讨，军事物资配送模式示意图如图 1.2 所示。他们指出，我军应当根据后勤保障层次的不同，建立战略、战役、战术三级配送中心。战略配送中心负责对各战役方向、热点地区实施基地投送式战略快速支援保障，战役配送中心向保障区域范围内的战役部队实施配送式器材物资保障，战术配送中心则为战术部队提供伴随保障。

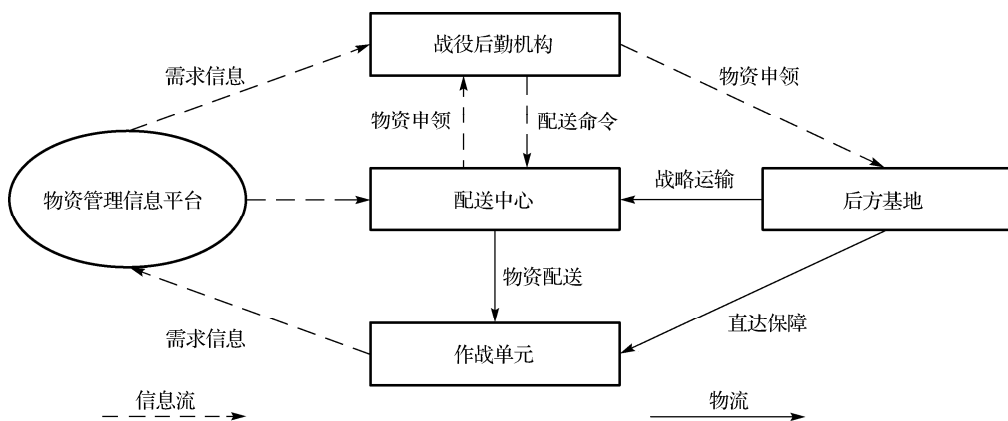


图 1.2 军事物资配送模式示意图

罗毅^[32]在分析国外几种典型军事物流供应链体系结构模型的基础上,提出了适合我军后勤物流体系的运行模式,即基于战区物流中心的军事物流体系结构,如图 1.3 所示。其基本观点是:按照区域保障与建制保障相结合、通用保障与专用保障相结合的方式,以军区为基础组织实施军区联勤保障。具体做法如下。

(1) 对于通用物资和通用勤务,按区域组织保障。以军区作战分界线为基准,把全国划分为若干军区联勤保障区,在每个军区联勤保障区内再根据作战方向、部队部署保障任务、行政区划和地形道路等条件划分为若干联勤分布保障区。在每个军区联勤保障区内设置一个功能完善的保障机构,负责对三军部队的通用物资统一供应,通用勤务统一组织,通用保障力量统一建设、管理和使用。通用物资保障的计划权、分配权仍由军兵种决定。

(2) 对于专用物资和专用勤务,按建制组织保障。具体是:专用物资专门供应,专用勤务自己负责,发展性经费专项保障,专用保障力量按系统建设、管理和使用。此外,通用物资和通用勤务保障计划仍由军兵种后勤系统逐级上报下达。

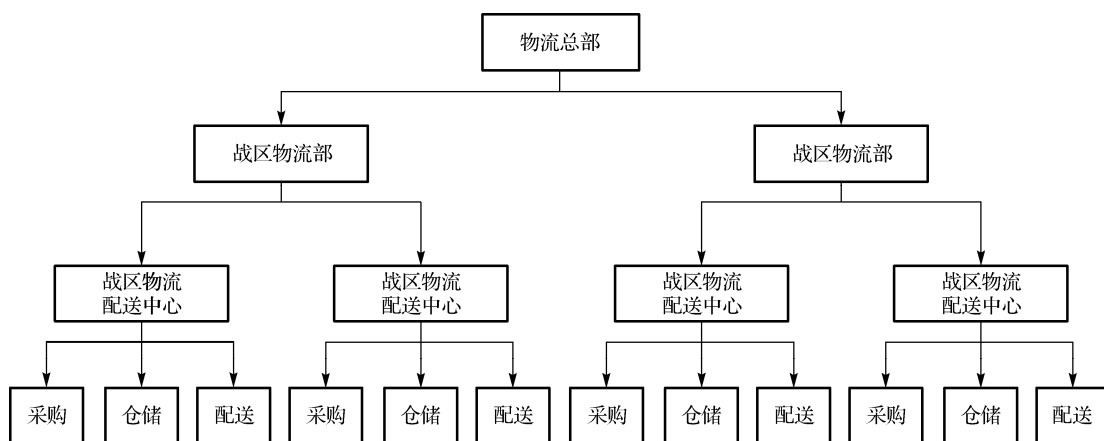
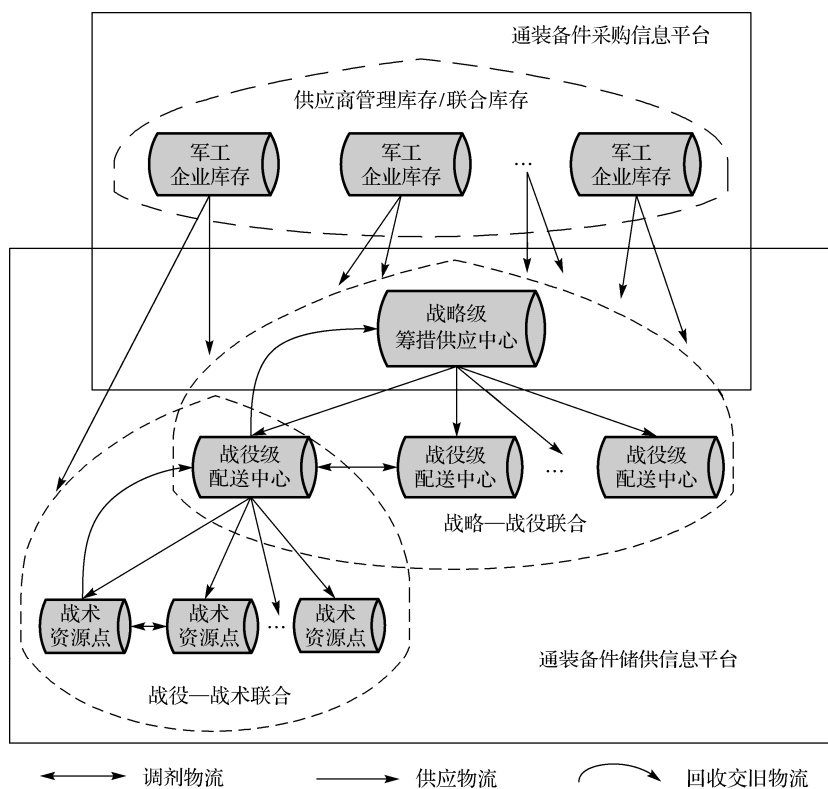


图 1.3 基于战区物流中心的军事物流体系结构

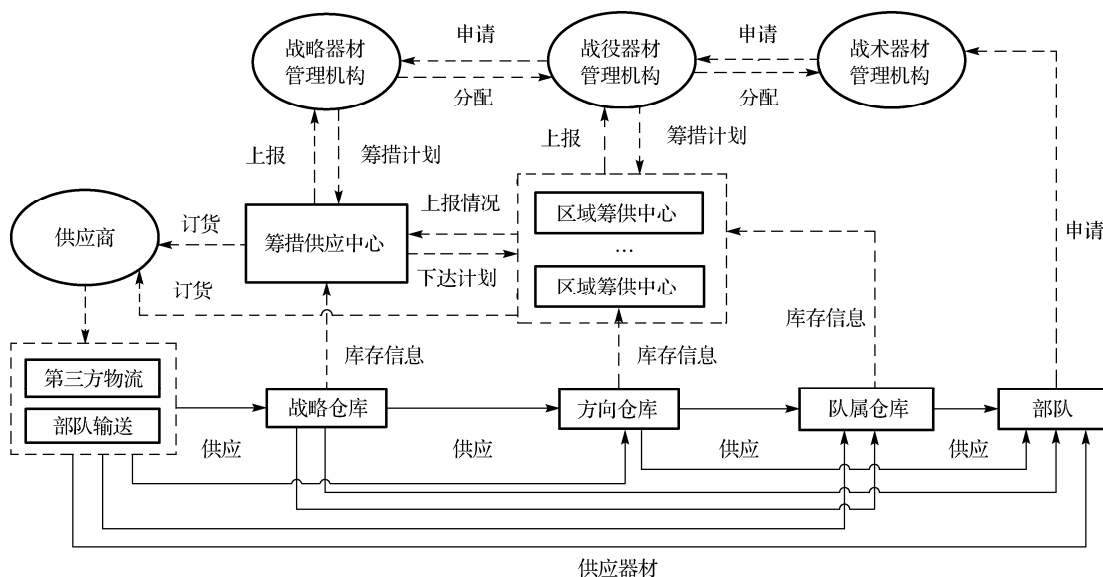
赵华、刘洪良、王高翔^[33]提出了战时群点式装备器材保障网络建设的构想。将目前的基地级单一综合保障器材仓库进行拆分,依据部队地域分布,结合作战单元装备部署特点和器材保障需求,以营或地域相对较近的多个连为一个保障集群,建立相对固定的若干靠前保障器材仓库;以连为基本保障点,建立多个可以伴随基本作战单元的小型伴随保障器材仓库,从而构成营、连二级装备器材保障供应体系,形成群点相依、群群协同、多点分散配置的靠前器材区域保障供应网络,可以有效增强装备器材保障供应的针对性,提高战时装备器材保障供应的时效性。

田新月^[34]引进供应链管理理论,提出了装备备件多级联合保障模式,对于我军创新备件保障理论、探索备件保障方法都具有一定的借鉴意义,多级联合保障基本形式如图 1.4 所示。

其中,“多级”是指战术、战役、战略和军工企业四级。“联合”包含三个层面的含义。第一是横向的联合,即装备七大专业之间的联合,也就是专业联合,专业联合的业务范围界定在不同专业之间备件的联合申请、联合存储、联合采办和联合供应。第二是纵向的联合,即在专业联合的基础上各级保障机构之间的联合,即多级联合。第三是军内外的联合,即军地联合,军地联合包括两方面的业务,一是军工企业参与到军方的保障业务中来;二是业务外包,即军方可以将运输、存储、包装、保养等业务外包给地方物流企业,实施军地联合保障,以减小军方物流作业的压力。



此外,王洪炜^[35]还提出了基于筹措供应中心的装备器材保障模式,如图 1.5 所示。虽然作者提出的保障模式主要针对的是装甲专业,但笔者认为可以在该模式上进行一定的拓展,考虑军械、车辆、工程、防化等其他专业的保障需求,构建基于筹措供应中心的多专业保障模式。



1.3.2 选址问题

1. 选址问题分类

现代选址研究起源于 1909 年,当时 Alfred Weber 为解决如何为单个仓库选址使仓库到多个顾客间的总距离最小的问题,在欧式空间中建立了一个 1-中位问题模型,即确定网络中的一个点作为服务设施,使得该服务设施到网络中各需求点之间的总距离最小,这就是著名的 Weber 问题。选址问题的研究历经多年,其理论体系已经较为完善,研究成果在现实生活中得到了广泛的应用。选址问题分类如图 1.6 所示。

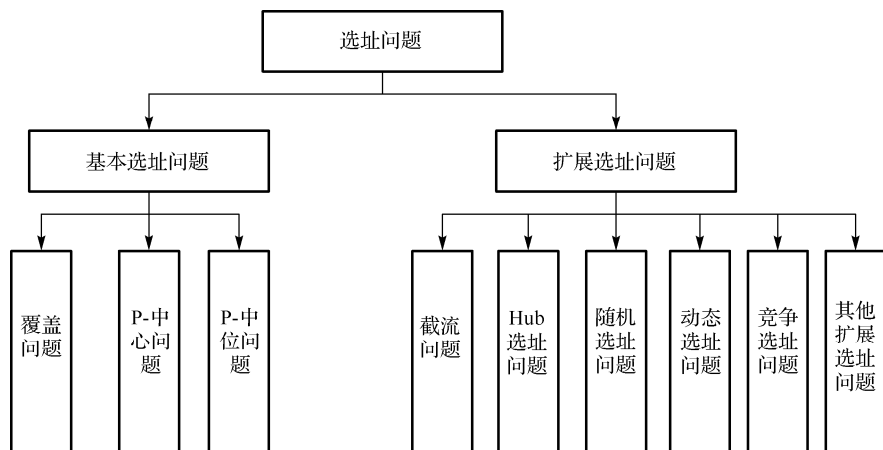


图 1.6 选址问题分类

选址问题可以分为基本选址问题和扩展选址问题。其中,基本选址问题包括覆盖问题、P-中心问题、P-中位问题,扩展选址问题包括截流问题、Hub 选址问题、随机选址问题、动态选址问题、竞争选址问题及其他在基本选址问题上扩展的选址问题。

覆盖问题可以分为最大覆盖问题和集合覆盖问题两类。集合覆盖问题研究的是在满足覆盖所有需求点的前提下,服务设施数目或投入建设费用最少的问题。最大覆盖问题或 P-覆盖问题研究的是在服务设施数目和服务半径已知的条件下,如何设立 P 个服务设施,使得可接受服务的需求量最大化的问题。

P-中心问题也称为 minmax 问题,是探讨如何在网络中选择 P 个服务设施,使得任意一个需求点到距离该需求点最近的服务设施的最大距离最小的问题。

P-中位问题也称为 P-中值问题,研究如何选择 P 个服务设施,使得需求点和服务设施之间的距离之和最小。

截流问题研究的是顾客需求产生的路线问题,根据服务设施的工作性质,可以分为服务型和对抗型两大类。服务型截流问题广泛应用于交通规划、交通服务、交通监测等方面,比如如何在交通路网中设立交通流量观测点,使监测到的交通流量最大的问题就是典型的服务型截流问题。对抗型截流问题用于解决收费、检查、缉私等站点的选址问题。

Hub 选址问题与截流问题比较相似,需求也是在 OD 对上产生的,顾客从 O 点出发到 D 点的过程中要接受 Hub 的服务。同截流问题不同的是,OD 流并不是走最短路线从 O 点到 D 点的,经过 Hub 中转服务后要比直接从 O 点到 D 点快,比如交通系统中的中转站、通信系统的交换机或服务器等。

随机选址问题考虑现实世界的复杂性,把服务设施的运行时间、建设成本、需求点位置、需求数量等部分或全部输入参数视为是不确定的。随机选址问题分为随机概率问题和随机情景问题。随机概率问题是指输入参数是服从某种分布的随机选址问题;随机情景问题是将不确定性分解成多个可能在将来发生的状态,同随机概率问题不同的是它是离散的随机问题,模型的目标是在所有可能的情况下达到最佳的。

现实世界中不仅存在着不确定性,而且存在着动态性,因此动态模型能更准确地反映实际问题,当然,考虑动态因素会不可避免地增加模型的复杂性和求解的难度。动态选址问题研究的是在未来若干时间段内服务设施的最优选址问题,在不同的时间段内动态选址模型的参数是不同的,但在某一具体的时间段内,模型的参数是确定的。

竞争选址问题考虑市场上存在两个以上的同类产品或服务的提供者,或者服务设施提供多个产品或服务的情形。目前的竞争选址研究集中在静态问题上,考虑确定和随机两种情况,研究背景多以连锁零售业为主。静态确定竞争选址问题是在现存的竞

争者已知且确定, 顾客只到最有吸引力的服务设施的“全有全无”假设的条件下研究的, 静态随机竞争选址问题是在引力模型的基础上研究的。

近年来, 选址理论发展迅速, 随着电子计算机的广泛应用, 各种基于智能算法和模糊算法的选址方法层出不穷, 如启发式方法、群决策方法、层次分析法、模糊综合评判法等^[37~41], 这些方法要么提高了算法求解效率(如启发式方法), 要么能够有效利用专家知识(如群决策方法), 通过模糊处理构建不便于定量表达的选址模型。

2. 选址问题求解方法

综合国内外选址问题的研究概况, 针对问题的特点, 不同的选址模型具有不同的求解方法。选址问题的求解方法归结起来主要可以分为: 解析方法、最优化规划方法、启发式方法、仿真方法及综合因素评价法^[42]。

(1) 解析方法

解析方法通常是指物流地理中心方法。这种方法通常只考虑运输成本对配送中心选址的影响, 而运输成本一般是运输需求量、距离及时间的函数, 所以解析方法根据运输需求量、距离、时间或三种的结合, 通过在坐标上显示, 以配送中心位置为因变量, 用代数方法来求解配送中心的坐标。

解析方法考虑的影响因素较少, 模型简单, 主要适用于单个配送中心的选址问题。对于复杂的选址问题, 使用解析方法常常感到困难, 通常需要借助其他更综合的分析方法。

(2) 最优化规划方法

最优化规划方法一般是在一些特定的约束条件下, 从许多可用的选择中挑选出一个最佳方案, 运用线性规划技术解决选址问题。一般需要具备两个条件: 一是必须有两个或两个以上的活动或定位竞争同一资源对象; 二是在一个问题中, 所有的相关关系总是确定的。

20 世纪 70 年代计算机计算能力的提升, 使得用最优化规划方法求解大型配送中心选址逐渐成为可能。最优化规划方法中的线性规划技术及整数规划技术是目前应用最广泛也是最主要的选址技术。据统计, 目前美国的各种选址软件中有 90% 的解决方案都是应用最优化规划方法得到的。最优化规划方法的优点是它是精确式算法, 能获得精确最优解。不足之处主要在于对一些复杂情况很难建立合适的规划模型; 或者模型太复杂, 计算时间长, 很难得到最优解; 有时候得出的解虽然是最优解, 但在实际中不可行。

（3）启发式方法

启发式方法是一种逐次逼近最优解的方法，大部分在 20 世纪 50 年代末期及 60 年代期间被开发出来。后来学者结合具体的研究对象对其进一步改造，形成多种启发式方法的扩展方法。在用启发式方法进行配送中心选址及网点布局时，首先要定义计算总费用的方法，拟定判别规则，规定改进途径，然后给出初始方案，迭代求解。

启发式方法与最优化规划方法的最大不同是它不是精确式算法，不能保证给出的解决方案是最优的，但只要处理得当，获得的可行解与最优解是非常接近的，而且启发式方法相对最优化规划方法计算简单，求解速度快。

（4）仿真方法

仿真方法是试图通过模型重现某一系统的行为或活动，而不必实地去建造并运转一个系统，因为那样可能会造成巨大的浪费，或者根本没有可能实地去进行运转实验。在选址问题中，仿真方法可以使分析者通过反复改变和组合各种参数，多次试行来评价不同的选址方案。这种方法还可以进行动态模拟，例如，假定各个地区的需求是随机变动的，通过一定时间的模拟运行，可以估计出各个地区的平均需求，从而在此基础上确定配送中心的分布。

仿真方法可以描述多方面的影响因素，因此具有较强的实用价值，常用来求解较大型的、无法手算的问题。其不足主要在于仿真方法不能提出初始方案，只能通过对备选方案进行评价，从中找出最优方案，所以在运用这种方法时必须首先借助其他技术找出一个初始方案，而且初始方案的好坏会对最终的决策结果产生很大影响。

（5）综合因素评价法

综合因素评价法全面考虑各种影响因素，并根据影响因素重要性的不同对方案进行评价、打分，以找出最优的选址方案。先分析确定备选地址应遵循的基本原则，然后从影响备选方案合理性的主要因素出发分析，选取评价体系，确定各指标的权重，组织相关专家对评价体系中的评价指标给出评价意见，然后通过一定的方式汇总专家意见，最终得出结果。代表方法有德尔菲法、模糊综合评判法、逼近理想解排序法、层次分析法等。

1.3.3 网络抗毁性

1. 网络抗毁性基本概念

Holme P 等人^[43]研究了不同打击策略对 Internet 等典型网络所造成的破坏，仿真结果表明，Internet 网络非常脆弱，只需要移除不到 10% 的节点，网络就可陷入瘫痪。

Holme P 等人的工作就是研究网络的抗毁性,即网络的抗破坏能力。通常用 invulnerability 或 survivability 来表述抗毁性,从字面意思看,这两个词分别表示“不脆弱性”和“生存性”。由此可见,抗毁性与脆弱性、生存性有着密切的联系。另外,国内一些学者还将抗毁性与可靠性、稳定性等概念等同。

学者们一般针对不同的网络(如军事网络、通信网络、物流网络等)赋予了抗毁性不同的定义,分析现有文献,目前关于网络抗毁性还没有统一的定义。

Ellison R J 等人^[46]针对信息系统的抗毁性提出:网络的抗毁性为网络在遭受意外事故、故障或攻击时,系统能够及时地提供完成其关键任务的能力。

Louca S 等人^[47]针对通信网络提出:网络的抗毁性包括两方面内容:①在出现故障的情形下,系统还能维持或恢复被用户所接受的性能的能力;②阻止或转移潜在服务故障的能力。

文献 45 研究了铁路网络的抗毁性,将铁路网抗毁性定义为“铁路设施或服务失效后,铁路网维持或恢复其性能到一个可接受程度的能力”,文献将从铁路网失效到网络被修复的过程分为 k 个阶段,用“突发事件”描述引起失效的原因,用“适应性”描述铁路网维持关键服务的能力,用“恢复性”描述铁路网修复并维持所有服务的能力。

文献 7 认为网络抗毁性是当网络中出现故障时,网络保持其通信业务的能力。对于一般的民用通信网络而言,这类故障通常是通信设备故障或通信线路故障。作者用四元组 $\{E, R, P, M\}$ 来描述网络的抗毁性指标,如果一个网络符合抗毁性指标,则说它是抗毁的。

E (Environment): 环境。E 是对网络预计的运行环境的描述,包括外部环境、可能发生的故障及变化等。

R (Specification Set): 指标集。网络所提供的服务的指标集,其中应包含一个核心指标,并要求网络在正常工作时能满足该核心指标。

P (Probability Distribution): 概率分布。 P 是遍布指标集 R 的概率分布,并且所有概率的和为 1。其中满足 R 中核心指标相对应的概率就是该网络正常运行的概率。与 R 中其他指标相对应的概率值是上限,它们定义了相应指标可以运行的最大时间百分比。

M (Finite-state Machine): 有限状态机。它用来描述网络如何在各种状态之间进行转换,这里的每个状态都与 R 中的指标相对应。

也就是说,在预想的环境 E 下,网络运行在状态机 M 所描述的各个状态中,根据每个状态对应的指标集 R ,计算出网络能够正常运行的概率 P 。如果这个概率能够达到或超过我们的期望值,那么这个网络就是抗毁的。

文献 44 总结了军事通信网络与一般通信网络相比,在抗毁性研究方面的特殊性。

①军事通信网络从技术构成上来看,仍然属于技术网络,其传输信息的机理和网络运行机制也与一般通信网络相似,因此可以借鉴一般通信网络的抗毁性指标来对其进行分析。

②军事通信网络的主要使命是保证己方各种命令、情报、信息、数据的畅通和及时、可靠到达,无法到达目标点的信息和不能及时到达目标点的信息与网络被物理完全摧毁在本质上都是一样的,都使得军事通信网络无法完成其使命要求,因此,军事通信网络在研究抗毁性时需将信息的可达性、及时性纳入抗毁性的研究内容。

③由于军事通信网络在现代战争中具有重要作用,其在战场上必然成为敌人火力打击的重点对象,也就是说,军事通信网络遭受选择性攻击的概率比遭遇随机故障的概率大。在总结军事通信网络特殊性的基础上,作者将军事通信网络抗毁性定义为:军事通信网络的抗毁性,是指通信网络在敌方有目的攻击的情况下保证军事信息及时可达的能力。该定义强调了军事通信网络抗毁性研究的重点是敌方蓄意攻击的情况,其衡量标准是在规定的时间要求下信息的可达能力。实际上,军事通信网络抗毁性还应考虑保密因素,用“军事指令在规定的时间内安全地传达到目标节点”定义军事通信网络抗毁性更为全面。

事实上,以上定义均是从网络的拓扑结构角度来阐述抗毁性的,结合装备器材保障网络的特点,对一般意义的抗毁性定义进行拓展,将运行在网络中的保障业务纳入抗毁性定义中,则装备器材保障网络抗毁性的定义如下。

定义 1.1 装备器材保障网络抗毁性 保障网络的节点、边或运载工具在遭受外界因素(如自然灾害、敌人火力打击等)而被中断时,依靠网络自身的拓扑结构属性及干扰处理预案,能够维持网络拓扑结构稳定性及保障业务可持续性的能力。

相比现有的抗毁性定义,该定义有以下两个特点:

(1)明确指出了外界可能对网络造成的中断形式,即节点、边及运载工具遭受中断;

(2)不仅从网络拓扑结构角度定义抗毁性,还从保障业务角度定义抗毁性(干扰处理预案对保障业务可持续性的影响),从而使抗毁性的定义更加全面,这实际上与装备器材保障网络的层次性特征有关。

2. 网络抗毁性研究的内容与方法

通过分析和总结笔者查阅的网络抗毁性方面的文献,网络抗毁性的研究内容大致可以分为三个方面:网络抗毁性测度、抗毁性网络设计、基于抗毁性的网络优化。如图 1.7 所示。

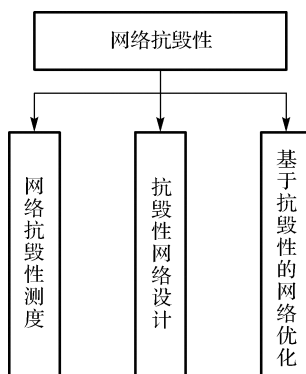


图 1.7 网络抗毁性的研究内容

（1）网络抗毁性测度

网络抗毁性测度构建一系列用于衡量网络抗毁性能力的量化指标，是进行网络抗毁能力分析、评估、设计、优化的基础。为了达到对抗毁性量化的目的，需要研究网络抗毁性的各种特性，并且设计各种抗毁性指标来定量地描述网络的抗毁性状况，并且要反映出不同网络的不同特性。目前，网络抗毁性测度的量化指标主要包括 11 个方面，如表 1.1 所示^[48]。

表 1.1 网络抗毁性的量化指标

序 号	指 标	说 明
1	有效性	在网络失效时，网络保持连通的程度
2	硬件体系结构设计	硬件独立于特殊软件的程度
3	连通性	网络中所有节点和链路连通的程度
4	正确性	指定服务被正确完成的程度
5	可靠性和耐久性	即使网络受到威胁，它也能继续提供服务的程度
6	均衡性	网络没有故障地组织和路由信息的程度
7	容错能力	有故障时持续工作，并且包含退化操作和恢复功能
8	协同能力	网络与网络之间互联、互协同的能力
9	预言能力	故障发生时提供有效对策的程度
10	可复原性	故障发生时可以及时恢复服务的能力
11	性能	关注的是量化因素：效率、完整性、可靠性、生存能力和可用性，子因素包括：速度、效率、资源需求、吞吐量和响应时间

文献 48 根据历年国内外的相关文献，将网络抗毁性测度总结为三个阶段。

第一阶段：抗毁性测度算法的基础阶段。该阶段主要基于纯图论进行网络拓扑的抗毁性研究。这个阶段论文的时间主要集中在 20 世纪 60 年代至 20 世纪 90 年代，目前也有部分学者在该领域进行研究。该阶段是图论理论基础发展的一个重要阶段，很多杰出的数学家如 Frank Harary 和 Klaus Wagner 等都为此做出了杰出贡献，并且提出

了许多与抗毁性测度相关的概念、定义和算法。这一阶段比较具有代表性的测度有点连通度和边连通度、坚韧度、离散数、完整度、点粘连度和边粘连度、离散度、连通因子和分解因子、生存性测度等。

第二阶段：抗毁性测度算法的应用阶段。这一阶段从 20 世纪 90 年代开始至今，随着计算机水平的不断提高，图论研究进入更实用的阶段，所以会考虑实际网络的一些约束，如网络性能等，研究者大都基于抗毁性测度在真实网络上的应用展开研究。这一阶段比较具有代表性的测度有网络距离、转发指数、跳面节点、波动性等。

第三阶段：复杂网络抗毁性阶段。这一阶段从 20 世纪末开始，随着 Watts 和 Strogatz 及 Barabasi 和 Albert 的两篇标志性文章的发表，抗毁性测度也进入了复杂网络时代。这一阶段比较具有代表性的测度有考虑复杂网络中的随机打击和蓄意攻击下的网络抗毁性测度、基于渗流理论分析的复杂网络抗毁性测度、考虑级联失效的复杂网络抗毁性测度、基于网络性能的负载网络抗毁性测度等。

（2）抗毁性网络设计

研究网络抗毁性的目的有两方面：一是设计出具有优良抗毁性的网络；二是对现有网络进行抗毁性分析，从而找出优化网络结构、提高网络抗毁性的途径。抗毁性网络设计问题的目标是建立一个物理上具备抗毁性的网络，它的主要研究内容是关于网络的物理连接、拓扑结构等，以及如何设计一个满足一定抗毁性要求的网络。如果网络中出现故障，那么如何确保网络中的所有节点仍然存在一条或多条物理连接，从而使得这个网络中的业务仍然能够不受影响，是抗毁性网络设计要解决的问题。

很显然，全连通网络的抗毁性最强，因为全连通网络能够确保在任何中断情况下，网络中的备份链路最多。但是，现实中的网络不可能是全连通网络，因为全连通网络的运行和维护费用是巨大的，在设计网络时，必须考虑建设成本。因此，对于一个给定的网络，已知其网络节点的数量、节点间的连接链路和每条链路的建设与运行成本，抗毁性网络设计的目标就是如何用最少的成本，建设一个满足一定抗毁性指标要求（如连通度）的网络。

抗毁性网络设计的过程如图 1.8 所示。

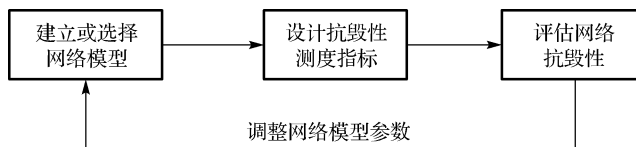


图 1.8 抗毁性网络设计的过程

由此可见，抗毁性网络设计实质上是一个依据抗毁性测度评估结果不断对网络模

型参数调整、反复迭代的过程。其中，对于网络模型来说，对已经存在的网络，一般只需进行实证研究，经过简单的抽象就可以将实际网络转换为可供研究的网络模型；对新设计的网络，通常根据网络设计要求与原则，建立网络演化模型，通过计算机生成网络的方法构建网络模型。建立或选择网络模型是抗毁性网络设计的基础准备工作，而抗毁性网络设计的难点则在于抗毁性测度指标的算法实现。例如，对于一个给定的无向图 $G(V, E)$ ，已知其每条边的开销 C_e 及每对节点 (i, j) 之间的连通度要求 r_{ij} ，要求寻找图 G 的一个最小开销子图，满足每对节点 (i, j) 之间的连通度最小为 r_{ij} 。在数学上已经证明，这类问题是一个 NP-Hard 问题^[49]。

文献 7 总结了两种提高抗毁性指标求解效率的方法。一种方法是分解法，即将复杂的抗毁性网络设计问题分解为简单的、容易计算或有已知求解算法的问题，以减小计算的复杂度。如 Ghoshghai 和 Rardin 设计了一个混合基因算法，用来把一个较大的网络分解成由若干由 k -树组成的网络，同时在计算过程中采用了一些优化方法使求解的速度有了较大的提高^[50]。另一种方法是通过增加约束限制的方式来求解某些特定情况下问题的解。例如，在设计通信网络时，增加网络中的传输流量及路径带宽限制，假设网络中每对节点间的数据传输使用 OSPF 协议的最短路径算法来选择传输路径，同时要求网络中每条边上的总流量不超出这条边的带宽限制，把这两个限制条件转化为数学表达式，代入抗毁性网络设计的求解过程后，可以获得较为理想的求解速度和求解质量^[51]。总体来看，抗毁性网络设计问题是一个非常复杂的数学问题，在某些特定条件下，可以设计一些有效的求解算法，但是对于大多数情况来说，求解仍然会导致较大的计算复杂度，抗毁性测度指标的计算始终是抗毁性网络设计的瓶颈。

（3）基于抗毁性的网络优化

实际上，图 1.8 所示的就是基于抗毁性的网络优化的过程。网络优化没有统一的方法，需针对不同的网络类型及网络抗毁性要求采用不同的优化方法^[52]。

一是充分利用备份机制提高网络恢复能力。例如，对于通信网络，经常利用备份链路或备份节点来对网络中断进行恢复，当网络中的某条链路或某一节点发生故障时，启用备份链路或备份节点，使通信迅速恢复。

二是充分利用各种优化算法提高网络服务质量。例如，对于物流运输网络，经常使用动态规划路径的方法来应对道路中断等外界干扰。

三是充分利用自我恢复技术提高网络的抗毁性。自我恢复技术通常需要依赖一些高新的网络技术，如移动通信网络中的网络自配置技术，根据目前的状态和故障情况，重新选择配置参数，对网络重新进行自我配置，实现网络的快速修复，从而提高网络的抗毁性。而在无中心的无线移动 Ad Hoc 网络中，每个节点同时具备主机和路由器

两种功能，所有节点作为同等实体互相连接，具有自组织、可快速展开、机动、多跳等特点，因此具有很强的抗毁性。

在进行装备器材保障网络抗毁性优化时，本书考虑了以下两个方面。

① 优化对象。由于装备器材保障网络是道路交通网络和保障业务网络的复合网络，具有物理层和业务层的层次性特征，针对业务层容易受外界干扰的情况，将优化对象定位在业务层的保障业务网络。

② 优化方法。由于优化对象是保障业务，不同于大部分文献中是针对网络拓扑结构进行优化的，因此传统的基于网络拓扑结构的抗毁性优化方法不适用于装备器材保障网络抗毁性优化，本书采用基于干扰管理理论对业务层网络进行抗毁性优化。

1.3.4 干扰管理理论与方法

1. 干扰管理理论基本思想

在现实世界中，事物无时无刻不处于不断的变化之中。例如，交通事故可能导致物流配送路线改变，天气原因可能导致航班延误、改变航线等。外界因素使得系统产生变化的行为称为干扰。干扰事件发生后，为了尽量减小干扰事件对系统产生的影响，需要以尽量小的扰动尽快恢复系统的正常运行，这就是干扰管理（Disruption Management）需要解决的问题。

关于干扰的研究早在 20 世纪 70 年代至 80 年代就已经开始，但是直到 20 世纪 90 年代，干扰管理这一概念才由 Clausen J 等人明确提出^[53]。目前，普遍认同的关于干扰管理的定义是由美国得克萨斯大学奥斯汀分校的 Gang Yu 教授在 2004 年提出来的^[54]，他认为：在计划开始阶段，用优化模型和求解算法得出一个好的运行计划；在计划实施过程中，由于内外部不确定性因素导致干扰事件发生，使原计划变得不可行，因此需要实时地产生新计划，新计划既要考虑原来的优化目标，又要使干扰带来的负作用最小化。

可以从三个方面来理解 Gang Yu 教授关于干扰管理的观点。

（1）制订并执行初始计划。从系统获取任务、制订计划，直到发生干扰的整个过程，都属于该阶段。初始计划往往是综合衡量费用、时间等因素而制订的，因而在无干扰的环境下，对于系统运行来说是最优的。

（2）辨识干扰事件。系统运行过程中不可避免地会受到外界因素的干扰，但不是所有外界因素都能对系统产生影响，只有那些对系统影响程度超出一定范围的外界因素才是我们关心的干扰源。

（3）制定有效的使系统扰动最小的救援策略和方案。在正确辨识干扰事件后，就

需要有针对性地制定扰动恢复策略,使系统恢复运行。新的系统运行方案相对于初始方案,往往不是最优的,扰动恢复策略的制定以扰动最小为目标,同时综合考虑费用、时间等因素,但一定要确保新的运行方案具有可行性。

干扰管理与应急管理属于不同的概念。国内学者陈安等人^[55]认为,干扰管理主要针对经常性的干扰事件(如工业生产中的暂时缺货现象、交通运输中出现的堵塞现象及航班的延迟等),研究消除其干扰影响的策略和措施。而应急管理主要针对突发性干扰事件,如 911 事件和 SARS 事件等,研究突发事件的应急对策和预案。

从 20 世纪 90 年代有学者明确提出干扰管理的概念到现在,干扰管理已发展成为国际上管理科学、运筹学和系统工程等领域中一个很受重视的研究方向,干扰管理思想已经在航班调度^[56~61]、铁路调度^[62,63]、机器协调^[64~67]、供应链调度^[68~72]、项目管理^[73~77]、工业管理^[78]等方面得到了广泛应用。

2. 干扰管理的研究方法

干扰管理实质上是一种基于运筹学原理解决干扰管理领域问题的方法。应用干扰管理理论解决干扰问题的基本思路是:建立干扰管理模型→设计模型求解算法。干扰管理的研究方法如图 1.9 所示。

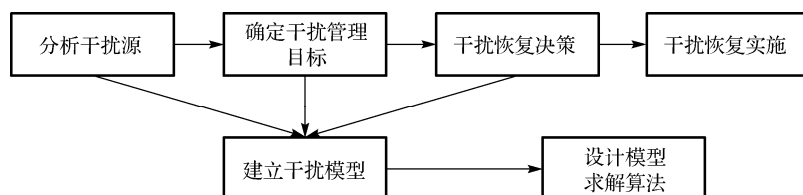


图 1.9 干扰管理的研究方法

(1) 建立干扰管理模型

干扰管理模型的建立需要根据实际问题 and 干扰事件的性质进行具体问题具体分析,它不是针对干扰事件发生后的状态彻底地重新进行建模和优化,而是以此状态为基础快速生成对系统扰动最小的调整方案,虽然也考虑费用最少的因素,但是所得到的方案往往不是费用最少的方案。

目前,干扰管理研究的文献比较少,在笔者所查阅的文献中,基本上都将干扰管理模型分为基于网络图的干扰管理模型和基于数学模型的干扰管理模型^[79~82]。

网络图模型是一种以图论为基础描述网络各组成要素之间关系的模型。Hane C A 等人^[83]首先将该模型引入航空领域,用于解决机组调度问题,随后 Ahmad I Jarrah 等人^[84]对模型进行了修改和扩展,构造了时空网络图模型,将费用最少网络流问题抽象,构造出基于时空网络图模型的线性整数规划模型。2004 年,刘英^[85]在航空领域的航班

调度干扰管理问题中,在时空网络图上增加虚拟的延迟航班和保护航班座位干扰管理方案,并相应地设定这些虚拟航班的运作成本和保护费用,使机械故障、天气影响等原因导致的航班取消或延迟造成的损失大大降低。

基于网络图来研究干扰管理问题,其优点是能够将网络中各个要素及要素之间的关系直观地表达出来,可以有效地增强问题的可识别性,降低问题的求解难度;缺点是网络图对于复杂的干扰管理问题缺乏深入的表达能力,而这一点恰恰是数学模型的优势。

应用数学模型来研究干扰管理问题,所建立的数学模型的基本形式为

$$\min f(x) \quad (1.1)$$

$$\text{subject to } x \in X \quad (1.2)$$

其中,式(1.1)代表目标函数, $f(x)$ 代表扰动程度的函数;式(1.2)代表约束条件。扰动发生后,目标函数根据扰动评价标准使新方案相对于原方案的扰动程度最小,扰动评价可以选择为使客户的满意程度最大、与原路线的偏离最小等。

随着干扰管理研究的深入,针对不同的问题类别和条件,其数学模型也呈现出不同的表现形式。但总体来说,大致可以分为两种:一种是精确型数学模型;另一种是模糊型数学模型。

精确型数学模型的内涵和外延非常分明,可以用精确数学描述。有代表性的精确型数学模型研究成果有:2001年,Howick S等人^[87]针对项目实施过程中顾客需求变动的问题,构建了基于系统动力学的数学模型,并通过仿真方法对干扰的影响进行了动态模拟。2003年,高虹霓、杨建军等人^[88]对最短路修复问题进行了数学描述和定义,建立了数学规划模型。2004年,王岑等人^[89]研究了在干扰管理下0-1背包问题的扰动修复的多目标决策模型。2005年,Zhu G等人^[90]研究了运行中的项目被干扰时的处理措施,建立了以成本偏离最小为目标的整数规划数学模型。2007年,Li J Q和Mirehandani P B等人^[91]以车辆故障、交通拥挤、交通事故这类问题为出发点,提出了选择备用车辆的多目标规划数学模型,采用混合线性规划及约束规划进行求解,最后结合算例验证了所设计模型求解算法的有效性。2008年,王雅楠^[92]以带有时间窗的可拆分的车辆路径问题(Split Delivery Vehicle Routing Problem with Time Windows, SDVRPTW)为研究背景,构建了物流供应需求量变动的多目标规划干扰管理数学模型。

模糊型数学模型的内涵和外延不是很清晰,要用模糊数学来描述。以干扰造成的偏差成本为评估标准之一的数学模型就是其中的典型代表。当干扰发生时,目标函数

和可行解集发生相应的变化,通过多个目标之间的权衡优化达到总目标的优化。为了符合干扰管理决策的灵活性要求,根据目标优先级的高低,通常采用字典序目标规划结构,即在约束不变的条件下,目标的优先级可以根据决策者的需要灵活调整。2004年,Gang Yu 和 Xiangtong Qi^[54]首先将该模型应用于最短路问题的干扰管理研究,根据干扰管理理论来选定扰动最小的方案。2011年,胡祥培等人^[93]针对干扰事件导致物流供应计划难以顺利实施这一难题,从客户不满意度、供应成本及路径偏离程度三个方面度量物流供应系统中的扰动,建立字典序的多目标干扰管理模型,并设计算例以验证模型的有效性。实验结果表明:该模型比已有的全局重新调度模型更科学,能够均衡各方的利益,得到的干扰应对方案对系统的扰动更小。因此,在实际应用中,基于字典序来构建干扰管理模型的多个目标优先级,可以提高模型的灵活性和实用性。

(2) 设计模型求解算法

目前,学者们普遍采用的解决干扰管理模型的求解算法主要可以分为精确算法(Exact Algorithm)和启发式算法(Heuristic Algorithm)两大类。其中,基于图论的求解算法、分支定界算法、单纯形法等都属于精确算法,遗传算法、禁忌搜索算法、粒子群算法、拍卖算法等都属于启发式算法。

早在1984年,Teodorovic D等人^[94]采用分支定界法求解了基于网络图的航班延迟的干扰管理模型。随后的1997年,Gou Wei等人^[95]对分枝定界法进行了改进,用于求解机组干扰恢复整数规划数学模型。Kouvelis P等人^[96]采用鲁棒精确算法求解了工件调度中可能发生的最严重的干扰问题的模型等。2003年,杨磊等人^[98]提出了解决TSP扰动恢复问题的轮换算法。2006年,杨磊等人^[98]提出了求解机器调度干扰问题的动态规划算法等。

精确算法适合于求解小规模结构较清晰的干扰管理问题。对于复杂的干扰问题,若采用精确算法,则获得最优解通常需要付出很大代价,而且通常难以获得理想结果。因此,解决干扰问题主要依赖于启发式算法。

启发式算法在搜索过程中利用启发信息改进控制策略,试图一次性提供一个或全部目标,通常情况下,在可接受的时间内可以求解出问题的满意解,但是具有一定的不确定性,并不能保证下一次也是在同样时间取得同样的结果。与精确算法不同,启发式算法通过启发函数过渡到下一步求解空间进行搜索,通常以搜索代价最小作为下一步搜索节点的确定原则。用于干扰管理的启发式算法主要有 Andersson T^[99]提出的拉格朗日启发式算法、针对小规模问题的 Dantzig-Wolfe 启发式算法、针对大规模问题的 Tabu 搜索启发式算法、Stutzle T^[100]提出的反复局部搜索(ILS, Iterated Local Search)算法、Mladenovic N 和 Hansen P^[101]提出的邻域变量搜索(VNS, Variable

Neighborhood Search) 算法等。学者们通常运用局部搜索方法来解决干扰管理问题, 局部搜索方法容易获得局部最优解但会使最终结果偏离全局最优目标, 为避免这一弊端, 有学者结合几种算法的优势, 避免陷入局部最优解。Michael Love^[102]等提出了 SALS (Steepest Ascent Local Search) 算法, 该算法结合 ILS 算法与 VNS 算法的优点, 大大提高了干扰管理模型的求解效率。

与精确算法相比, 启发式算法具有解决大规模复杂干扰管理问题的能力, 但多数启发式算法存在共同的不足, 即搜索时间与结果满意度之间存在矛盾。目前, 干扰管理的很多算法理论都围绕如何尽可能化解这一矛盾而进行研究。

1.3.5 文献总结

(1) 区域物流理论与实践研究

区域物流是物流领域的重要分支, 但不论是国内还是国外, 相关研究成果还不多, 特别是可以转换为生产实践的研究成果非常少。国外的区域物流一般集中于物流技术、物流优化等底层层面, 而且研究内容偏向实证研究, 而国内由于受到市场流通环境等因素的影响, 多偏重于宏观层面的理论研究, 实证研究非常少。

从笔者查阅的相关文献来看, 在区域物流理论在军事领域的应用方面, 外军尚未明确提出区域保障的概念, 我军则主要集中在后勤保障方面。由于我军实行的是后装分离的体制, 区域物流理论具体到装备保障中的应用, 不论是理论研究还是实证研究, 都非常少。装备器材保障作为装备保障的重要组成部分, 担负着为我军各类装备维修保障提供物质基础、为装备恢复战斗能力创造条件的重任, 而我军现行装备器材保障模式又存在专业条块分割、保障资源利用率不高等缺点。因此, 本书将尝试应用区域物流理论构建具有“专业合并管理、分级划区保障、综合集成运行”特点且符合装备保障“四合四统”建设理念的装备器材区域保障模式, 丰富和完善区域物流理论在装备保障领域中的应用, 从保障模式上探索提高装备器材保障军事效益的方法, 详见第 2 章。

(2) 选址问题

到目前为止, 选址问题的建模方法已经发展得非常完善, 在现实生活中也得到了广泛的应用, 甚至对于一些不便于用模型定量表达的选址问题, 也通过其他渠道得到了解决(如基于群决策的选址方法)。限制选址问题进一步深入研究的是选址模型的求解方法。现实中许多问题, 虽然能够用数学模型描述清楚, 但由于变量过多、约束过弱等原因, 导致模型求解非常复杂, 甚至用传统方法不可能求解。对于求解复杂的模型, 人们通常退而求其次, 采用各种职能算法获取模型的满意解, 即使如此, 有时

仍存在模型无法求解的情况。

本书研究的装备器材保障网络,依托现有路网作为网络的边,网络中的节点主要包括资源点、需求点、连接节点,依托地域中的主要交通枢纽作为网络的连接节点,在需求点分布,一定的前提下,设计装备器材保障网络主要考虑如何确定各级资源点的位置分布,以及与需求点之间的服务分配关系。装备器材保障网络由于其具有军事特性,必须在设计阶段考虑网络的抗毁性,将抗毁性作为网络的基本设计属性,也就是说,在各级资源点选址时必须考虑网络的抗毁性设计要求。从笔者查阅的相关文献来看,考虑网络服务成本、服务质量、服务效率等因素的选址研究非常多,而在选址时兼顾网络运行成本和网络抗毁性设计要求的研究文献几乎没有。为了满足装备器材保障网络在平时运行的成本经济性要求及在应急条件下运行的抗毁性要求,本书对装备器材保障网络设计的关键技术进行研究,设计一种两阶段选址方法,第一阶段在构建选址评价指标时就充分考虑抗毁性设计要求,第二阶段则在第一阶段选址结果的基础上考虑网络运行成本因素,详见第3章。

(3) 网络抗毁性

随着计算机技术的广泛与深入应用,关于网络抗毁性的研究已经引起国外研究者越来越多的重视。从研究程度上来看,国外研究起步较早,已拥有一定的理论基础,且国外研究涵盖了网络抗毁性测度、抗毁性网络设计与抗毁性网络优化三个方面。在国内学术界,网络抗毁性方面的研究开展得较晚,与国外的研究水平存在不小的差距,已有的文献主要围绕抗毁性的测度及网络优化方面,抗毁性网络设计方面的文献较少。

实际上,很难界定一个网络是不是复杂网络,但不论是复杂网络还是普通网络,它们都有网络上的共性,因此可以借用研究复杂网络的思路和方法来研究普通网络的一些特性^[45,103,104]。装备器材保障网络不但要在平时负责向部队需求点提供维修器材保障,在战时也有大量、频繁的器材保障任务,因此,装备器材保障网络的抗毁性至关重要,如何度量保障网络的抗毁性就成为必须要解决的问题。为了对装备器材保障网络的抗毁性进行度量,本书采用复杂网络抗毁性测度的研究思路,根据装备器材保障网络兼顾一般网络和军事保障网络的特点,构建保障网络抗毁性测度指标体系,并应用所构建的指标对网络抗毁性进行度量,得出保障网络抗毁性的相关结论,详见第4章。

(4) 干扰管理理论与方法

一方面,干扰管理理论是一种新兴的管理思想,它与应急管理、重调度管理等传统管理理念有本质区别,干扰管理追求的是当系统受到外界干扰时,如何尽可能地消

除外界对原方案的扰动,所得出的新方案可能不是费用或时间最优的,但是一定是可行的。

另一方面,虽然干扰管理理论提出的时间不长,但在很多行业里已经得到了广泛的应用。但是,运用干扰管理理论解决军事物资运输干扰问题的研究非常少,从笔者查阅的文献来看,目前只发现金丽亚^[105]运用干扰管理理论对装备器材应急调度决策做了一定的研究。因此,结合装备器材保障网络在实际运行时必然会受到干扰(自然因素或敌方蓄意攻击)的实际情况,利用干扰管理理论研究装备器材保障网络中断恢复策略问题、优化保障网络抗毁性,既具有实际的军事应用价值,又具有较高的理论意义,详见第5章。

1.4 研究思路、内容及结构

本书的研究思路可以总结为“两个阶段、四个步骤”,两个阶段指网络设计阶段、网络抗毁性分析与优化阶段,四个步骤指保障模式构建、保障网络设计、网络抗毁性度量、网络抗毁性优化。其中,保障模式构建和保障网络设计构成了网络设计阶段,网络抗毁性度量和网络抗毁性优化构成了网络抗毁性分析与优化阶段。在网络设计阶段,主要解决“区域器材保障网络的运行机制是怎样的”及“如何设计区域器材保障网络,关键技术是什么”两个问题。在网络抗毁性分析与优化阶段,主要解决“构建的保障网络抗毁性怎么样,如何度量”及“网络受到外界干扰时如何确保其抗毁性”两个问题。本书的研究思路如图1.10所示。

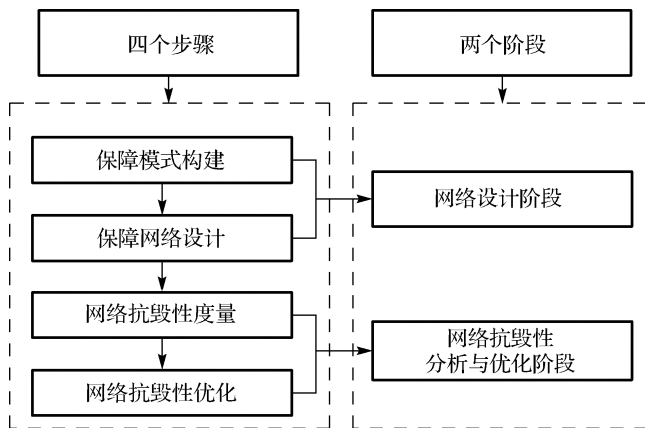


图 1.10 本书的研究思路

本书共6章,其中,第2~5章是本书的主体内容。各章研究内容安排如下。

第 1 章为绪论。介绍本书研究背景、研究意义,对相关研究现状进行综述,包括区域物流与实践研究、选址问题、网络抗毁性及干扰管理理论与方法,明确本书的研究方向和研究方法,最后对本书的研究思路、内容及结构进行简要介绍。

第 2 章研究装备器材保障模式。介绍装备器材保障的相关概念,在深入分析现行装备器材保障模式的基础上,提出基于区域保障的装备器材保障模式,并对该模式的组织机构、平战时的保障业务、信息处理机制等进行了深入研究,最后分析装备器材保障网络的构成及特点,采用空间扩展建模与分析方法对装备器材保障网络进行描述,确定装备器材保障网络的设计要求,为后面网络的设计与优化研究奠定基础。

第 3 章研究装备器材保障网络设计关键技术。装备器材保障网络设计的关键环节是对网络中的各级保障中心进行选址,为了兼顾保障网络运行成本的经济性和网络抗毁性设计要求,将装备器材保障中心选址问题划分为两个阶段:第一阶段基于群决策理论确定候选资源点,是初选阶段;第二阶段基于双层混合整数规划模型确定资源点与需求点的服务分配关系,是终选阶段。首先,分析装备器材保障网络选址问题,明确选址对象、研究思路与方法;然后,构建选址评价指标体系,基于群决策理论确定候选保障中心;接着,建立基于双层混合整数规划的选址模型,确定资源点与需求点之间的服务分配关系。

第 4 章研究装备器材保障网络抗毁性度量方法。为了检验所构建的装备器材保障网络的抗毁性,设计网络拓扑层抗毁性指标和网络业务层抗毁性指标。首先分析与建立装备器材保障网络抗毁性研究框架,其次建立拓扑层和业务层的抗毁性指标,并对指标的关键算法进行设计和实现,最后进行网络抗毁性实验,分析各抗毁性指标在不同打击策略下的数值变化,并最终得出装备器材保障网络的抗毁性结论。

第 5 章研究装备器材保障网络抗毁性优化。针对装备器材保障网络在实际运行中必然会受到外界干扰的问题,研究相应的中断恢复策略。首先对业务层中断恢复问题进行分析和定义,提出基于 4 种基本救援策略的中断恢复确定原则和实施流程,然后建立基于多目标的业务层中断恢复模型,针对多目标模型求解的复杂性,采用基于 NSGA-II 的启发式求解算法,最后设计一个业务层中断实例,对模型和算法进行验证。

第 6 章结论与展望。归纳主要完成的工作,分析存在的不足,对下一步研究工作进行了展望。

本书框架如图 1.11 所示。

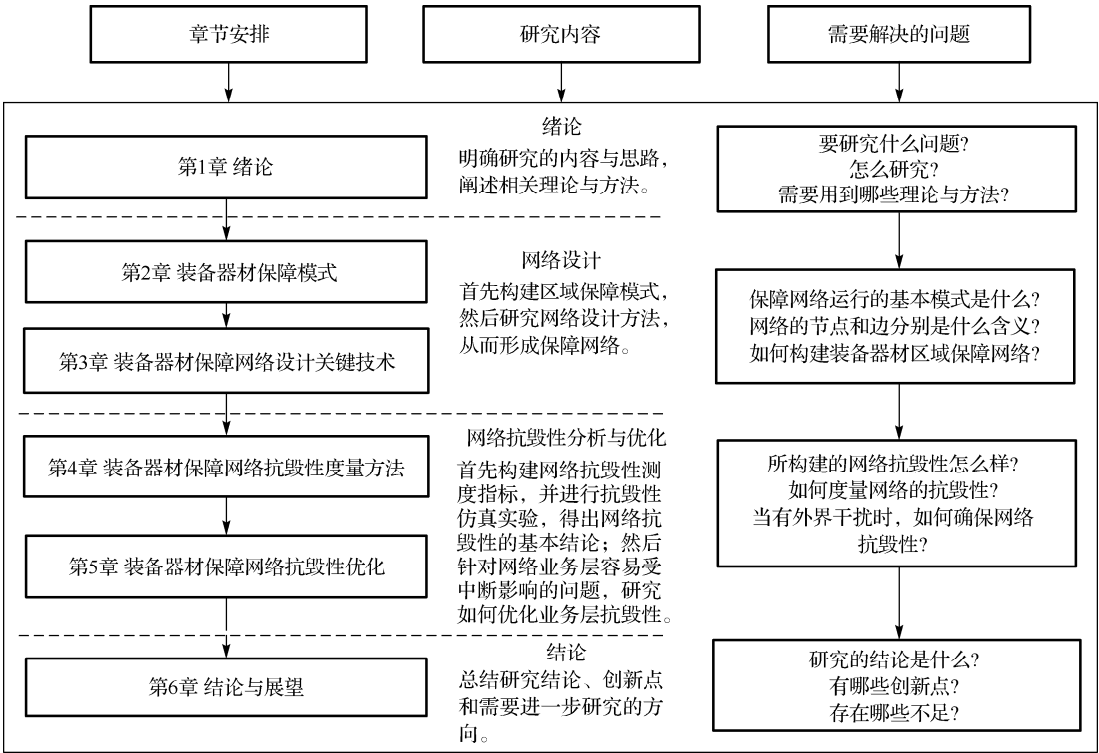


图 1.11 本书框架

第 2 章 装备器材保障模式

装备器材保障涉及军械、装甲、车船、工化 4 个专业，目前实施的是各专业独立保障，具有专业分割管理、保障资源利用率不高等缺点，不能很好地满足信息化条件下装备联合作战的需求。基于这样的背景，以“四合四统”为基本思想，以区域物流理论为基本方法和理论支撑，本章设计一种装备器材保障模式。

本章内容安排如下：首先对现行保障模式进行分析，总结现行保障模式的特点及存在的不足，在此基础上构建装备器材保障模式，分别从组织机构、业务处理和信息处理三个方面详细阐述，然后，对装备器材保障网络的构成、网络描述模型、层次结构特性、网络设计要求等内容进行了详细描述，为后面的网络设计、抗毁性度量与优化等研究奠定基础。

2.1 相 关 概 念

本书的研究对象是装备器材保障网络，与之相关的概念有装备、装备保障等，本节将对这些基本概念进行简单介绍。

(1) 装备^[106]

从一般意义上说，装备通常是指各军兵种或若干军兵种共同使用的武器装备。但我军装备的界定相对狭窄，根据 2004 年 5 月 24 日施行的《中国人民解放军装备保障规定》，“装备，是指通用军械、装甲、工程、防化、通用车辆、陆军船艇等装备的统称”。此外，我军常常将陆军装备与装备等同，或将陆军装备与装备视为同一类型，以区别于其他军兵种的专用装备，因为其他军兵种范围内的装备大多数是陆军使用的装备。实际上，随着武器装备的种类越来越多，陆军也有一些专用装备是其他军兵种所没有的，因此，装备并不完全等同于陆军装备。

由此可见，装备以陆军装备为主，但陆军装备并不全部在各军兵种中使用，并且陆军装备的专用程度也越来越高。鉴于此，如无特殊说明，本书所采用的装备的概念泛指陆军装备及其他军兵种的装备，主要包括军械装备、装甲装备、工化装备、车船装备 4 类。

（2）装备保障

根据 1997 年版的《中国人民解放军军语》，保障是指“军队为遂行各种任务而采取的各种保证性措施与进行的相应活动的统称”。由此可以得出：装备保障，是军队为遂行各种任务而对所使用的通用武器、武器系统和军事技术器材等所采取的各种保证性措施与进行的相应活动的统称。装备器材保障是装备保障的重要组成部分，是保持和恢复装备战术技术性能、发挥作战效能的物质基础，同时也是一种重要的军事活动。

按照装备的不同，装备保障可分为通用武器装备保障、弹药保障、雷达装备保障、导弹装备保障、装甲装备保障、工程装备保障、防化装备保障、车辆装备保障、船艇装备保障。

（3）装备器材保障

2011 年 12 月出版的《中国人民解放军军语》定义装备保障为“军队为满足作战及其他任务的需要在装备调配、维修、经费等方面组织实施的保障”。装备保障的两大任务是整装装备的提供与管理 and 装备技术状况的保持与恢复。而对于已列装装备而言，装备保障的重点在于装备技术状况的保持与恢复，装备维修是装备技术状况保持和恢复的主要手段，而装备器材保障则为装备维修提供维修所需的器材，是装备维修得以正常实施的基本前提条件。因此，装备维修和装备器材保障便成为部队装备保障的两大主题。

这里给出装备器材保障的定义：装备器材保障是装备保障的重要组成部分，是在适当的时机、适当的位置，为“使装备经常处于或迅速恢复良好状况”，提供适当数量器材所进行的一系列采购、存储、供应及其他相关活动。装备器材保障是器材保障机构根据装备修理机构的需要向其提供器材而导致的一系列相关活动。为使装备器材保障过程得以持续进行，装备器材保障活动应该包括往复循环的 4 个方面的活动：器材申请（计划）、器材筹措（采购）、器材存储、器材供应（包括运输）。装备器材保障业务分类示意图如图 2.1 所示。

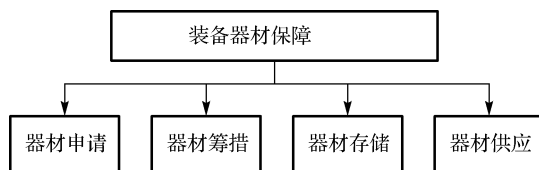


图 2.1 装备器材保障业务分类示意图

（4）装备器材区域保障

装备器材区域保障是指按照一定的保障原则，将保障地域划分为若干区域，实施分级划区保障。与现行的保障模式相比，区域保障是一种综合性保障，区域内的相关保障资源按照“四合四统”要求建设，由保障资源面向单一专业向面向多专业转变。

2.2 现行装备器材保障模式分析

2.2.1 现行装备器材保障模式的特点

(1) 条块分割式管理

目前, 战略和战役级装备器材保障按专业进行对口管理。为完成本专业的器材保障任务, 各专业保障机构都设立独立的器材储备资源点、独立的筹措渠道、独立的器材供应物流系统, 专业机构之间在器材保障业务方面几乎没有交叉与协作。条块分割式管理的结果是各专业在器材保障的各环节都建立了“小而全”的保障系统。条块分割式管理示意图如图 2.2 所示。

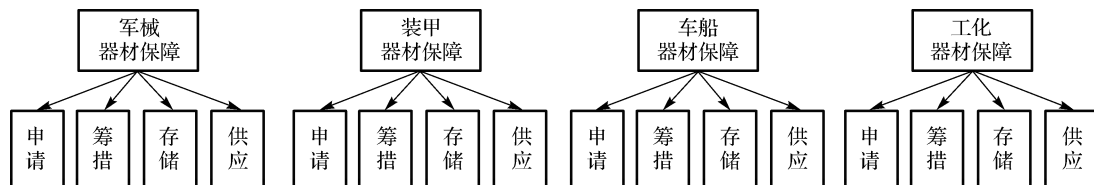


图 2.2 条块分割式管理示意图

(2) 分布式存储

现行体制下, 装备器材按专业进行保障, 各专业都设置了 5 级资源点进行器材储备, 即总部战略资源点、军区战役资源点、集团军战役资源点、师(旅)战术资源点、团战术资源点, 其中战术资源点是按专业合并的。由此可见, 装备器材存储结构是一种典型的有重点的分布式存储方式。

(3) 集中式筹措

装备器材筹措, 就是装备器材主管部门通过各种形式和渠道, 有组织、有计划、有选择地进行申请、采购、订货和调配等一系列筹集器材的活动。通常, 只有军区和总部具备筹措权限, 军区以下机构不具备独立筹措权限。军区自筹和总部统购都是按照专业组织实施的, 一年进行两次订货, 一次为主要订货, 一次为辅助订货。主要订货完成了大部分订货, 辅助订货只是对主要订货的补充和微调。保障机关根据下级上报的年度需求计划与器材生产企业签订订货合同, 器材生产企业根据订货合同组织生产, 合同规定的器材交付时间一般为 1~10 个月。由于保障机关一年组织一次订货, 每次订货都要为器材生产企业预留 1~10 个月的生产周期, 各级器材保障机构都必须有大量库存来应对一年中器材消耗的不确定性。因此, 集中式筹措成为器材库存水平居高不下的重要原因之一。

目前，总部有关单位正在对全军装备维修器材的筹措模式进行改革，从经济效益上看已经取得了一定的成效。事实上，经济效益只是衡量改革成效的一个方面，如何准确把握部队实际需求，科学制订筹措计划，制定、完善和落实装备维修器材筹措制度，是改革需要进一步发展的方向。

（4）垂直式供应

目前，装备器材一般以一年为一个供应周期，各级根据年度器材消耗量确定下一年的申请量，并逐级向上汇总。器材由军区和总部机关集中订货，并按现有库存数量与库存标准的差额，每年分一到两次逐级向部队发放。在供应上采取逐级申请、逐级上报、统一订购、逐级下发的形式，在保障层级上包括总部、军区、集团军、师（旅）、团这 5 级，是一种典型的“纵向一体化”的申请与供应方式。垂直式供应管理示意图如图 2.3 所示。

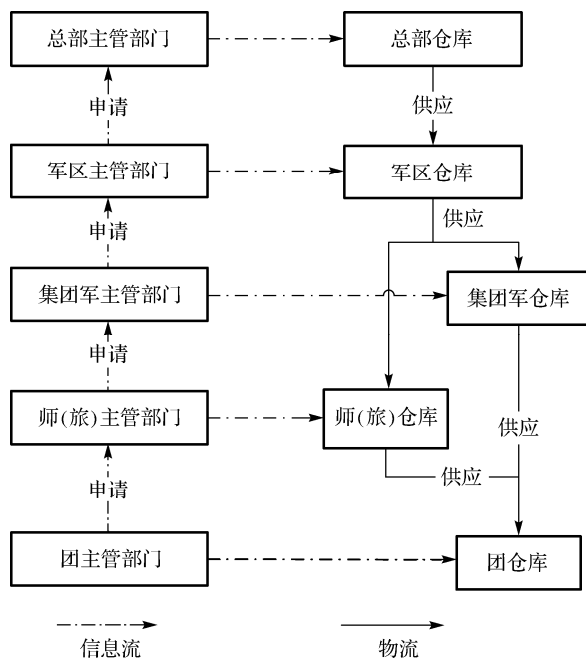


图 2.3 垂直式供应管理示意图

2.2.2 现行装备器材保障模式的不足

现行装备器材保障模式是按专业进行区分的，例如，为了对全军装甲装备实施器材保障，总部设置装甲局，统管全军装甲装备保障工作（器材保障就是其重要职能之一），总部设置战略级器材仓库，军区、集团军、装甲旅每级都设置器材仓库，对各级实施器材保障。装备器材各专业保障机构设置也基本呈现类似的格局。这种保障模式在我军被

长期沿用保留至今,有利于单兵种作战或少量兵种联合作战,然而,随着多兵种联合作战逐渐成为未来战争的发展样式,现行的保障模式逐渐暴露出一系列弊端。

(1) 条块分割式管理导致专业间缺乏合作协调机制

在目前的装备器材保障体制中,实行各专业独立保障,从基层部队到总部机关,每个专业都建立了自己“小而全”的器材保障力量,在器材的筹措、存储、供应、信息处理等环节均独立运行。装备器材保障虽然包含军械、装甲、车船、工化4个专业,但是由于各专业的装备存在一些共性,如军械专业的一些大型装备(如自行火炮)的底盘采用了装甲专业中坦克的底盘,两个专业的部分维修器材就可以公用、通用。因此,如果专业间存在合作协调机制,则对提高装备器材保障军事效益是非常有益的,然而,现行的条块分割式管理则阻碍了专业间合作协调机制的形成。

(2) 分布式存储导致应急条件下器材集结效率不高

受装备维修体制的影响和制约,目前的装备器材保障在存储结构上呈现总部战略资源点、军区战役资源点、集团军战役资源点、师(旅)战术资源点、团战术资源点的5级分布式存储结构。这种存储结构的优点是资源点离修理单位近,可以方便资源点对修理单位实施器材保障。应急条件下,这种存储结构在器材集结效率上就显得低下,这是由于应急器材保障通常以供应时间短、器材需求量大为特点,需要临时从多个资源点快速调剂器材。在目前的分布式存储结构下,每个资源点的器材存储量不会太大,且由于专业间缺乏调剂机制,显然不能很好地满足应急条件下器材集结对时间和数量的要求。

(3) 集中式筹措导致器材采购经济效益不高

目前的装备器材筹措机制主要以总部统购和军区自筹为主,军区以下单位没有器材采购的权限。实施这种集中式筹措的前提是需要提前将需求汇总到具有器材采购权限的单位,通常采取由下向上逐级汇总的方式进行。在需求汇总过程中,各单位都希望本级的器材存储有一定的冗余量,以满足装备维修对器材需求的不确定性,同时需求预测盲区的存在导致器材需求汇总到具有采购权限的单位后,器材需求量往往比部队实际的器材需求量大,产生了需求放大现象,最终使得器材筹措部门花更多的资金去采购器材,从而使得器材筹措的经济效益降低。

(4) 垂直式供应导致器材供应效率不高

现行的装备器材供应机制是典型的向上逐级申请、向下逐级发放的垂直式供应方式。这种垂直式供应方式的优点是供应中层级分明,从而便于组织和管理。然而由于申请与供应中涉及的环节过多,导致需求响应慢、器材保障效率不高,缺点非常明显,特别是在应急条件下,目前的垂直式供应方式就显得非常不适应。

（5）现行保障模式下器材保障网络抗毁性不高

可以从两个方面来理解现行保障模式下器材保障网络抗毁性不高的问题。一是由于条块分割式管理导致保障网络节点间缺乏足够的调配保障机制，使得目前保障模式的网络化程度不高，而网络抗毁性的高低通常与网络节点间连接关系的复杂程度成正比^[54]；二是在现行保障模式下，各资源点通常依附部队驻地开设，主要出发点是便于保障，在资源点选址时，没有将抗毁性单独纳入选址考虑因素范畴。

（6）信息共享困难，缺乏统一的信息处理平台

在总部有关部门的推动下，近年来各专业都在不断尝试在保障过程中加大信息化力度，组织研发了一批业务信息系统。这些信息系统的研发，一方面确实提高了装备器材保障的信息化处理能力，提高了保障的军事效益，另一方面，由于缺乏统一的规划和统一的平台，这些信息系统呈现出“孤立”的状态，系统与系统之间缺乏信息共享的渠道和机制，没有从根本上发挥信息系统对装备器材保障业务的辅助作用。因此，在装备器材保障信息处理上，有必要站在装备器材保障的全局高度，在上层信息平台建设框架的约束下，建立信息处理标准，统一信息处理平台，从根本上指导装备器材保障的信息化建设。

2.3 基于区域保障的装备器材保障模式构建

2.3.1 保障模式构建原则

装备器材保障模式的构建，应当以未来一体化作战保障需求为牵引，以区域物流理论、供应链理论、装备保障理论为支撑，以提高整个保障系统的快速反应能力为目标，依托先进的信息技术，构建适应未来一体化联合作战的装备器材保障新模式。

（1）符合“四合四统”基本要求

作战决定保障，保障为作战服务，一体化联合作战是未来战争发展的必然样式，在保障模式上也要求一体化保障，装备保障“四合四统”理念正是在这样的背景下提出来的。装备器材保障作为装备保障的重要内容，其保障模式必须符合“四合四统”的基本要求和基本原则，在保障模式上要求由专业条块分割、相对分散向综合化、区域化、一体化转变，在保障能力建设上要求由相对单一向多样化转变，在保障管理模式上要求由粗放式管理向精细化管理转变。

（2）提高网络在应急条件下的抗毁性

一方面，除平时条件下可能由于非战争原因（如雪灾、地震、水灾）干扰网络运行外，装备器材保障网络由于其具有军事特性，在战时不可避免地会遭到敌方火力的蓄意攻击；另一方面，在未来战争中，装备保障对战争胜负的影响力日益增大。因此，

提高装备器材保障网络在战时条件下的抗毁性, 具有非常重要的军事价值, 而在保障网络设计阶段就将抗毁性因素纳入网络设计属性, 是提高保障网络抗毁性的有效途径。

(3) 兼顾网络在平时条件下运行成本的经济性

显然, 在设计阶段必须考虑网络运行成本的经济性因素。随着军事斗争准备的加速, 部队每年的训练任务增多, 装备使用强度增大, 维修保障任务加重, 导致器材保障成本也随之增加。器材保障成本增加主要体现为两方面: 一是器材需求量增加导致的筹措经费增加; 二是各级资源点器材存储量增加导致的库存管理成本增加。将器材调配保障机制纳入装备器材保障模式中, 为呆滞器材的有效利用提供机制保证, 可以有效减轻器材订货压力, 从而减少筹措经费。合理的保障模式能够根据保障任务优化各级资源点库存, 有效降低器材库存管理成本。

(4) 提高保障信息处理能力

美军完成机械化后正在逐步推进信息化军队建设, 我军也一直以机械化、信息化跨越式发展为军队的建设目标。由此可见, 信息在未来战争中担负着与装备、作战人员等传统作战要素同等重要的角色。在未来战争中, 信息将贯穿整个装备保障过程, 完善的信息处理机制、高质量的信息处理平台, 将成为未来装备保障能力建设的核心要素之一。因此, 构建装备器材保障模式必须充分考虑信息网络平台的重要作用, 利用先进的信息网络平台、科学的信息处理机制, 提高装备器材保障模式下保障网络的保障效能。

2.3.2 保障模式总体结构

在介绍总体结构之前, 先引入几个有关的概念。

定义 2.1 建制供应 需求点 A 向所属直接建制保障资源点 B 申请器材, 在资源点 B 库存充足的情况下, 资源点 B 向需求点 A 直接供应器材, 称为建制供应。

定义 2.2 调剂供应 需求点 A 向所属直接建制保障资源点 B 申请器材, 资源点 B 库存不足, 在相关机构的统一协调下, 由 A 的非建制保障资源点 C (或多个其他资源点) 向需求点 A 供应器材, 称为调剂供应。

定义 2.3 越级供应 需求点 A 向所属直接建制保障资源点 B 申请器材, 资源点 B 库存不足, 将申请传递到资源点 B 的上游保障资源节点 C, 由资源点 C 向需求点 A 供应器材, 称为越级供应。

定义 2.4 资源点 本书定义资源点为全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心的统称。

定义 2.5 需求点 指器材供应的对象, 本书中特指军区及以下部队各级修理单位和队属仓库。

装备器材保障网络体系建立的总体思路可以描述为：在全军范围内建立 1~2 个全军装备器材保障中心（简称全军保障中心）；按照需求点的分布地域，打破军区及专业限制，将全军范围统一划分成若干保障区域，每个区域建立 1 个装备器材区域保障中心（简称区域保障中心）；在每个区域内建立若干装备器材群点保障中心（简称群点保障中心），直接向需求点配送器材。

装备器材保障网络体系总体结构示意图如图 2.4 所示。全军保障中心一般位于腹地纵深或战略后方，具有较好的隐蔽条件和完整坚固的防御工事，并配有一定数量的防御力量。保障区域的规模根据部队需求点的分布及器材需求强度进行划分，区域保障中心一般位于保障区域的中心位置，这样有利于快速为下级保障中心提供器材支援。群点保障中心则直接面向部队需求点，采取部队申请、群点保障中心主动配送的方式向部队提供器材保障。这样就形成了“全军保障中心—区域保障中心—群点保障中心”的三级器材保障模式，每一级都有完整的存储、运输调度、装卸载及信息处理能力，同时新保障模式的组织机构独立于现行部队编制，有利于更加灵活地开展保障工作。

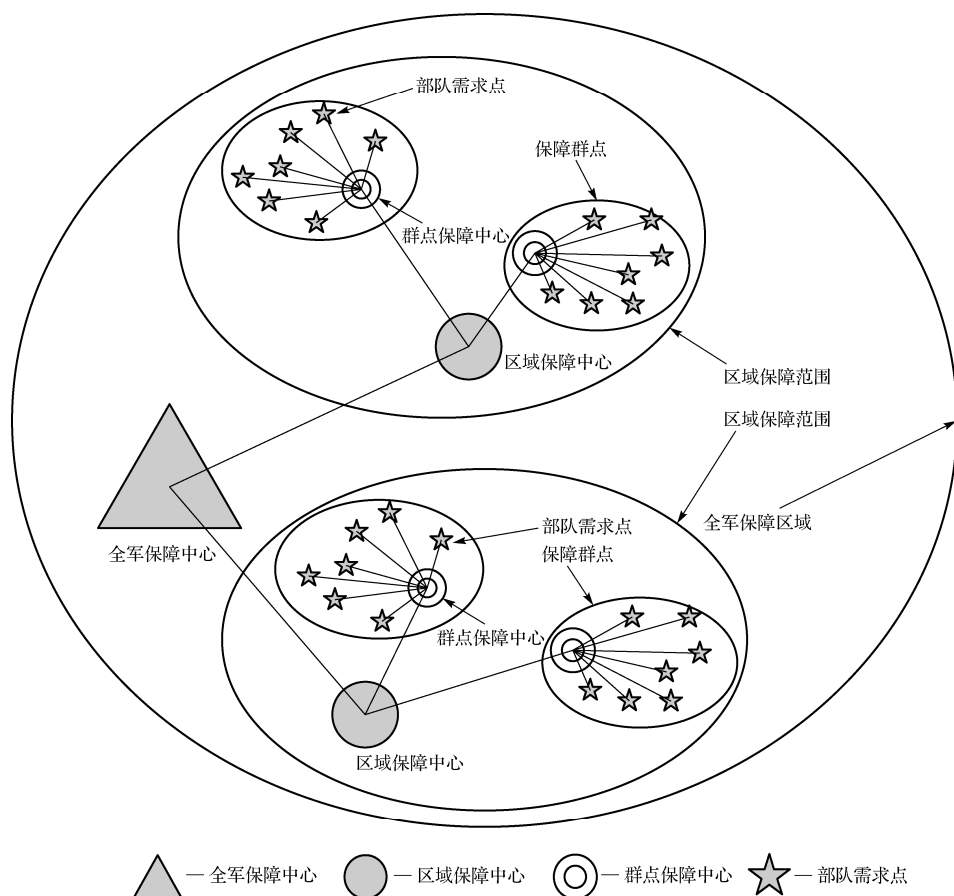


图 2.4 装备器材保障网络体系总体结构示意图

2.3.3 组织机构及其职能

装备器材保障的组织机构示意图如图 2.5 所示。在装备器材保障组织机构中，总装装备保障部是最高执行机构，下面依次设置全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心三级保障业务执行机构。各级组织机构分工协作，共同完成全军范围内的装备器材保障。

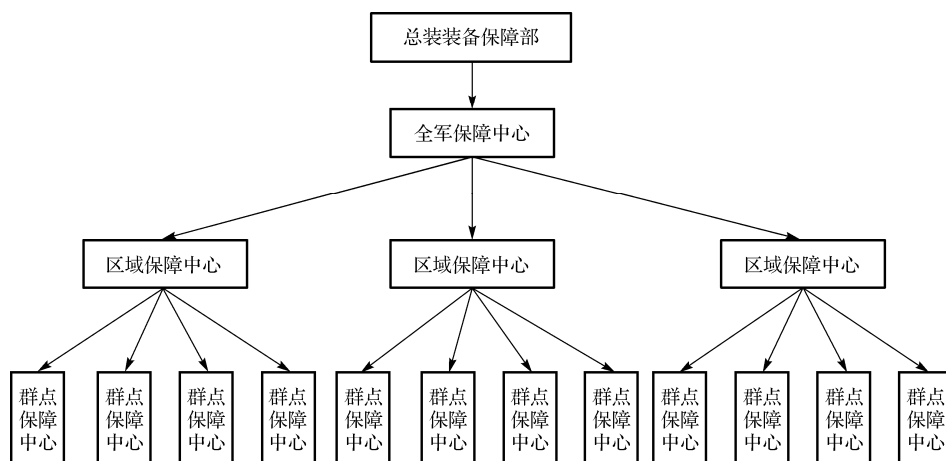


图 2.5 装备器材保障组织机构示意图

(1) 全军保障中心

全军保障中心直属于总装装备保障部，主要职能如下。

① 决策制定。全军保障中心作为装备器材保障业务的最高执行机构，制定各种决策是其重要的职能之一，决策涉及全军范围内的器材实物供应与经费保障、器材调度、器材筹措等多方面内容。

② 器材供应。主要供应对象是各区域保障中心。由于区域保障中心分布广、数量少，因此适宜采用“大批量、多品种、长周期”的集中式供应。另外，全军保障中心也承担对部分热点地区实施战略快速越级保障的职能。

③ 器材调度。在平时条件下，器材调度主要表现为在各区域保障中心之间调剂呆滞器材，以提高呆滞器材的利用率，将呆滞器材变“废”为宝，优化全军范围内各区域保障中心的整体库存结构。在器材调剂过程中，按照“实物等值交换、差额经费补偿”的原则，即区域保障中心之间互相交换呆滞器材，价格差额部分由全军保障中心统一拨付经费补偿。在战时或应急条件下，全军保障中心承担器材调度指挥决策中心职能，调度对象延伸到全军范围内的各群点保障中心，指挥、协调各级资源点为器材预置点或前方修理所实施器材供应。

④ 器材筹措。依托信息网络,全军保障中心准确把握全军范围内的器材库存,并对下一阶段消耗做出科学预测。根据掌握的器材库存情况及下级单位提出的器材需求,全军保障中心主要对通用器材、贵重器材筹措进行决策,以“按专业订货为主、专业联合订货为辅”为原则,适当打破专业限制,统一组织开展器材订货会,与厂家签订采购合同。在器材筹措决策制定过程中,考虑各专业间公用器材(如装甲专业的坦克底盘与军械专业的自行火炮底盘存在较多公用器材),视情采取专业联合订货策略,以避免现阶段各专业器材同物不同价的问题,规范器材采购价格管理体系。在器材筹措组织实施形式上,对于单一来源的器材,全军保障中心需严格监督器材采购价格与器材质量,通过组织专家审价、谈判等形式规范器材价格;对于非单一来源的器材,充分利用竞争性采购模式,力求以最少的经费购买质量最好的器材。工厂生产(或代购)的器材,根据全军保障中心的统一安排,分别发往全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心三级资源点。器材进入各级资源点后,应建立器材质量跟踪机制,对于出现严重质量问题的器材及部队用户反映较好的器材均逆向追踪到相关厂家,为下一次订货时进行厂家选择决策提供依据。

(2) 区域保障中心

根据需求点的地域分布,在全军范围内划分若干保障区域。每个保障区域设置一个区域保障中心,全面负责本区域的器材保障工作。主要职能如下。

① 决策制定。与全军保障中心类似,区域保障中心也担负决策制定职能,不同的是决策制定的范围仅限于本保障区域,涉及本区域范围内的器材申请、器材实物供应与经费保障、器材调度、器材自筹等内容。

② 器材申请。区域保障中心的器材主要来源于两方面:一是由全军保障中心统一下拨;二是由本级自行筹措。对于由上级下拨的这部分器材,区域保障中心需根据本区域的器材需求及库存情况向全军保障中心提出器材申请,申请的全过程实现网络化办公,通过筹措网络信息平台上传至全军保障中心。器材申请决策质量的高低直接影响上级筹措决策及对下级器材保障满足率。

③ 器材供应。区域保障中心的主要供应对象是下属各群点保障中心,采取“按需随时补充”的补货策略。同时,区域保障中心也视情承担一定量的越级供应,将器材直接送达最末端的需求点。

④ 器材调度。与全军保障中心类似,区域保障中心有权对本区域内各群点保障中心的器材进行调度,增加器材流通,及时处理呆滞器材,提高器材的利用率。器材调度仍然以“实物等值交换、差额经费补偿”为基本原则。在平时,原则上只在本区域内进行器材调度,在应急条件下,服从全军保障中心的统一调度。

⑤ 器材自筹。区域保障中心具有器材筹措权限，筹措对象主要是本区域内的专用器材及由于量少等原因全军保障中心未统一订购的器材。区域保障中心自筹需在全军保障中心有关部门的监管下实施，自筹的组织实施形式可参考全军保障中心执行。

（3）群点保障中心

群点保障中心是装备器材最直接的供应实体，主要承担配送职能。部队需求点直接向群点保障中心提出器材需求申请，群点保障中心接到申请后，若库存能够满足需求，则组织配送力量将相应的器材配送到部队仓库，同时将相关信息登记在网络上。若库存不能够满足需求，则向区域保障中心上报，区域保障中心根据器材需求的数量、时间紧迫程度、本区域内器材库存分布的约束条件对器材供应的具体形式（如区域保障中心越级供应、区域保障中心向群点保障中心补货后由群点保障中心实施供应、从其他群点保障中心调剂供应等）进行决策。群点保障中心必须对向区域保障中心申请补货的时机、器材品种与数量做出及时、正确的决策，使库存保持在一个合理的水平，尽可能防止出现部队需求点需要某些器材而群点保障中心没有的情况。另外，区域保障中心为群点保障中心下拨一定比例的采购经费，用于特殊情况下群点保障中心自行筹措器材，群点保障中心具有一定的器材筹措权限，但需要在上级业务部门的监管下严格履行采购经费使用程序。

2.3.4 保障模式中的业务处理

在新的保障模式下，装备器材保障的相关业务流程将与以往有所不同。装备器材保障业务包含器材筹措、器材存储、器材供应三项主要业务，每项业务都有很丰富的研究内容，如新模式下的筹措决策流程、器材库存控制策略等。由于本书研究的是装备器材保障网络，因此重点研究器材供应的业务流程。本节就平时和战时两种情况分别对装备器材保障供应业务流程进行描述。

首先引入两个基本概念。

定义 2.6 临时请领 也叫非计划性请领，指某些特殊情况下急需器材而本级仓库不能满足，向上级单位请领器材的行为。

定义 2.7 周期请领 也叫计划性请领，通常一年两次，一次是主要供货，另一次是辅助供货，按照建制逐级向下发放，是仓库补充器材的主要渠道。

1. 平时保障业务处理

平时条件下，装备器材保障实行“以建制供应为主，区域内调剂供应为辅”的保障模式。其基本思想是：部队需求点向相应群点保障中心申请器材，群点保障中心检

查本级库存是否满足需求。若满足,则直接向需求点配送器材;若部分满足,则首先将能提供的部分器材配送给部队需求点(是采取一次性供应,还是采取先供应一部分再补充供应剩下部分的形式,需要根据部队的申请提前期、上级器材供应时间长短及部队需求点对器材需求的紧急程度决定),然后向区域保障中心提出器材需求申请,由区域保障中心解决剩下的需求;若不能全部满足,则向区域保障中心提出器材需求申请,区域保障中心做进一步决策。区域保障中心受理群点保障中心的器材需求申请,检查本级库存及区域内相关器材在各群点保障中心的数量分布,对保障方式做出决策。若是下级临时性请领,则可以采取调剂保障和越级供应保障:若采取区域内调剂保障,则向相关群点保障中心下达器材调配命令,由它们负责安排配送力量,将器材配送到部队需求点;若采取越级供应保障,则安排本级配送力量,将器材配送到部队需求点。若是下级周期性请领,则采取补货保障,由本级配送力量向下级保障中心补充器材。当区域保障中心不能满足器材申请需求时,则向全军保障中心提出器材需求申请,全军保障中心做进一步决策。若是下级临时性请领,则采用越级供应,由全军保障中心直接向部队需求点供应器材,平时条件下原则上不实施跨区域调剂保障,因为这样带来的运输成本会很高;若是下级周期性请领,则采取补货保障,由本级配送力量向下级保障中心补充器材。最后,当全军保障中心缺货时,需向工厂订货,签订临时采购合同,由工厂直接向部队需求点或相关保障中心配送器材。

平时条件下装备器材保障业务过程如图 2.6 所示。

需要特别指出的是,调配保障是在不得已的情况下采取的一种保障方式,与建制供应保障相比,调配供应保障必然带来运输成本、管理成本上的增加。因此,不论是哪级,在受理下级申请时,都应首先考虑本级直接向下级供应,其次才是调配保障。为了减少调配保障数量,区域保障中心和全军保障中心需要实时、准确地掌握下级资源点的器材库存分布及部队器材消耗规律,在适当的时机对所属区域内的资源点的器材实施调剂,做到未雨绸缪,而不是一定要等到有器材需求申请且本级供应不上器材时才考虑器材调剂。

2. 战时保障业务处理

在战时条件下,装备保障实行“跨区域联合保障”模式。其基本思想是:器材需求点通过储供网络信息平台将器材需求信息上报到全军保障中心,全军保障中心根据需求点地域附近的资源点及其库存分布,对器材保障的具体方式做出决策,由需求点地域附近的资源点对其实施联合保障。

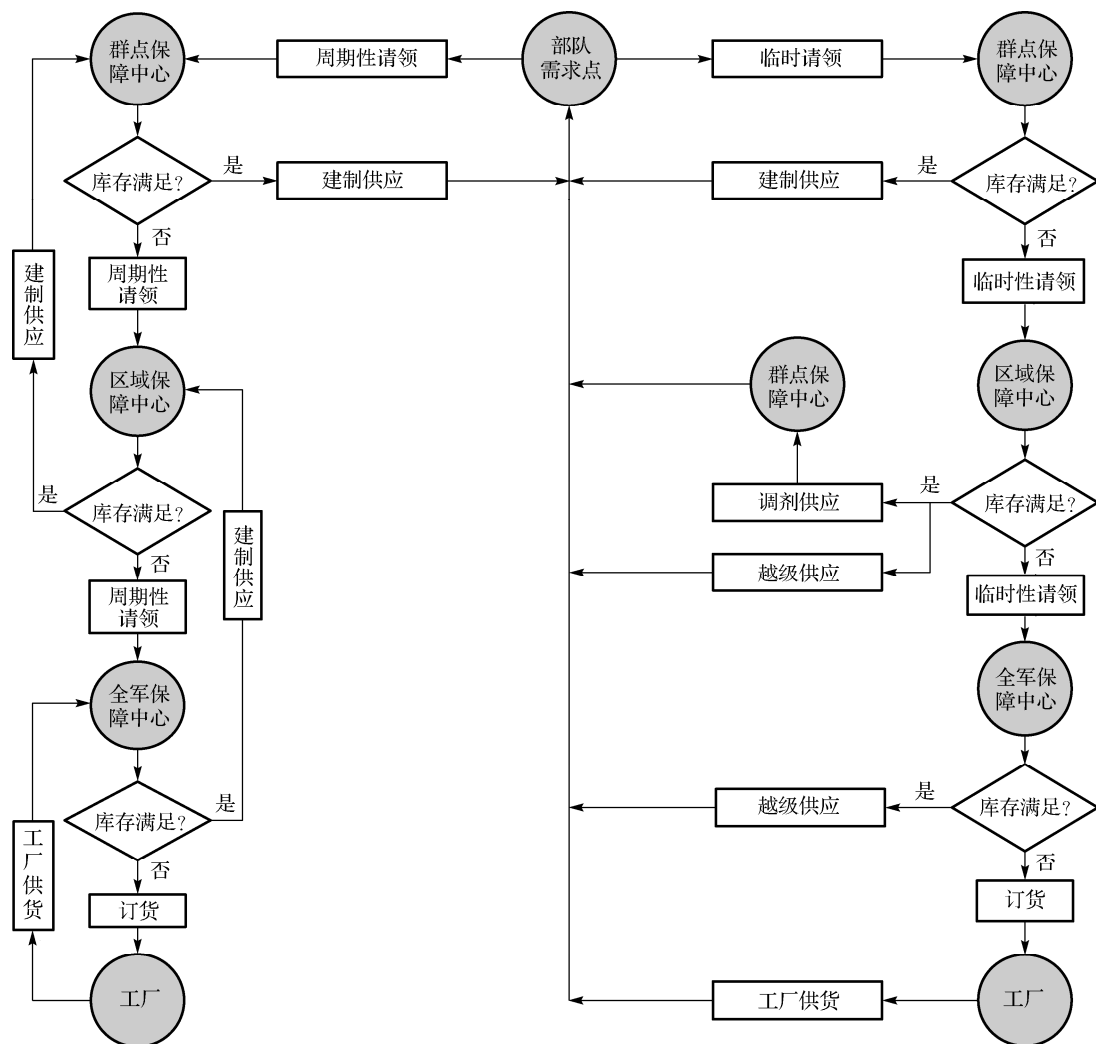


图 2.6 平时条件下装备器材保障业务过程

战时条件下装备器材保障的首要目标是满足时效性要求，器材没有在规定时间内送达，器材的军事价值将随之降低甚至失去。战时条件下的装备器材保障与平时条件下有所区别，主要体现在以下几个方面。

(1) 保障对象。平时与战时保障对象区别如图 2.7 所示，在平时条件下，资源点和需求点的位置相对固定。应急条件下，部队作战地域不固定，全靠平时条件下的资源点将无法及时满足时效性要求。从历次局部战争中可以看出，在战前通常会在可能的战场区域内选择若干器材预置点，提前集结器材，由器材预置点向前进基地、临时补给站等需求点提供器材保障。因此，各级资源点在战时的一项主要任务就是为器材预置点提供器材保障，同时也直接向前线修理分队等器材需求单位提供器材保障。

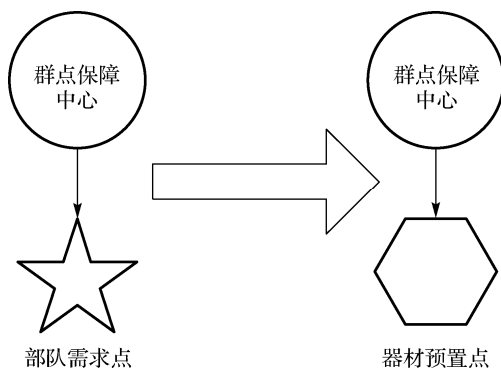


图 2.7 平时与战时保障对象区别

(2) 保障原则。平时与战时保障原则区别如图 2.8 所示，在平时条件下，实行“建制供应为主，区域内调剂供应为辅”的区域内联合保障模式，这主要是从保障成本的角度考虑的。在战时条件下，保障时效性的优先级要高于保障成本控制，以靠前保障、就近保障为基本原则，打破区域限制，实施跨区域联合保障，由平时条件下的“一对多建制保障”变为“多对一联合保障”。

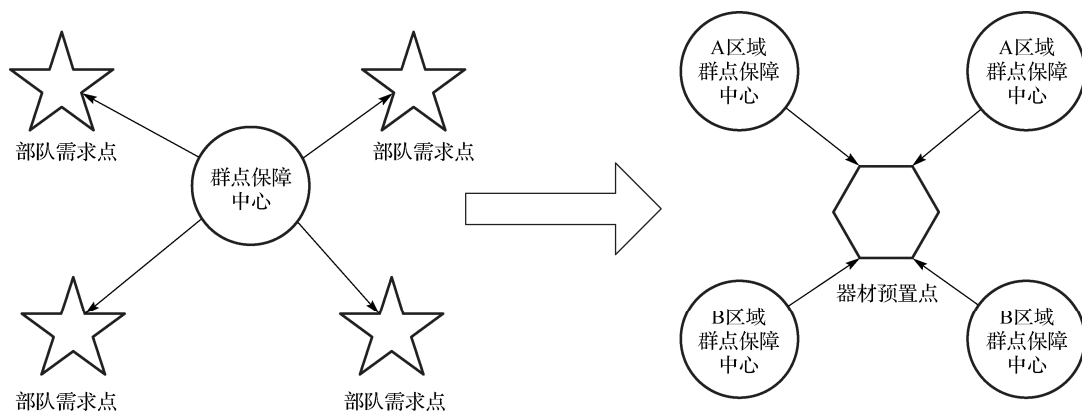


图 2.8 平时与战时保障原则区别

(3) 保障流程。平时与战时保障流程区别如图 2.9 所示，在平时条件下，主要实行建制逐级保障。在战时条件下，为满足时效性要求申请，实行跨区域联合保障，即：需求点直接向全军保障中心提出器材需求申请，全军保障中心根据器材需求点所在的位置，打破平时条件下的区域保障限制，调用器材需求点周围的群点保障中心和区域保障中心的器材保障力量，向需求点快速配送器材。必要条件下，全军保障中心可以直接向需求点实施器材快速投送，也可协调地方工厂实施军民联合保障。

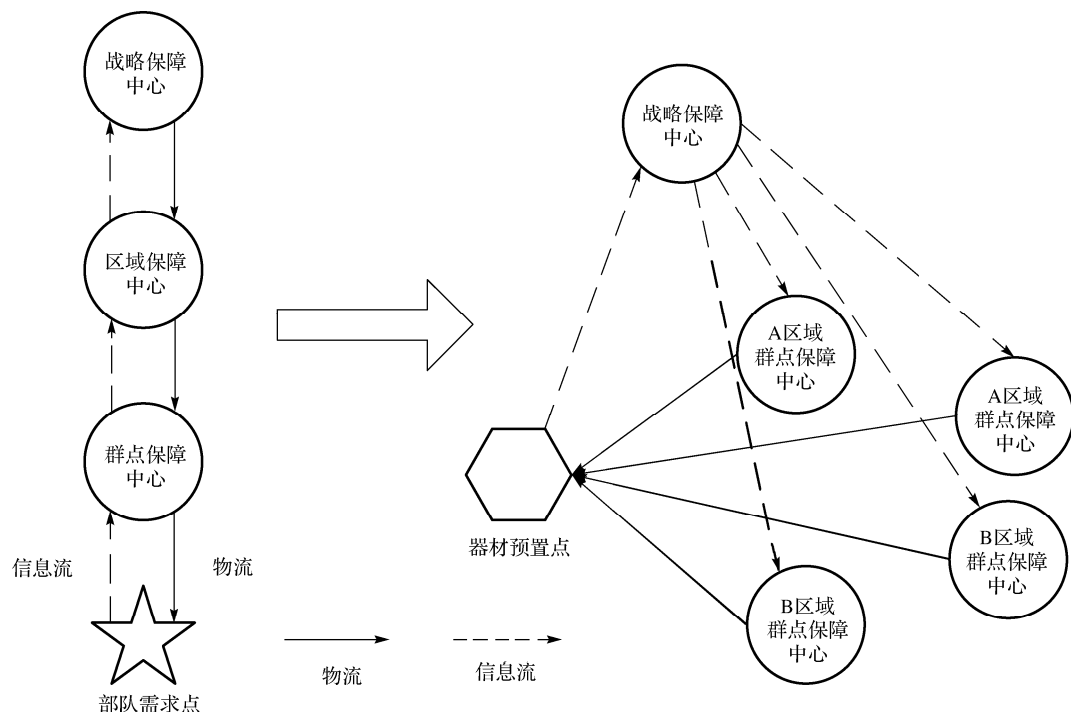


图 2.9 平时与战时保障流程区别

2.3.5 保障模式中的信息处理

近几次局部战争表明，无论是作战指挥还是装备保障，信息都扮演着重要的角色，信息已经与传统意义上的武器装备、作战人员、战略战术等战争胜负决定因素并驾齐驱，共同决定和制约着战争的胜负。装备器材保障网络的高效运行，必须依托先进的信息网络和信息技术手段，保障业务也必须实现网络化、信息化。

1. 信息网络平台总体结构

装备器材保障网络信息平台的网络结构简图如图 2.10 所示。

装备器材保障网络信息平台包括“装备器材储供网络信息平台”和“装备器材筹措网络信息平台”。

“装备器材储供网络信息平台”简称“储供平台”，是军队内部全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心和部队需求点之间进行数据交换与信息共享的平台。群点保障中心和所负责的部队需求点公用一个部队数据库服务器，用于受理部队需求点的器材申请，完成器材入库、出库、配送等相关业务；每个区域保障中心都有自己的独立数据库，负责本区域内的数据交换，随时掌握本区域内各战役资源点的库存与消耗情况；全军保障中心建立全军战略保障数据库服务器，负责全军的数据交换，随时掌

握全军各单位的器材消耗与库存情况。各级都通过 ADO.NET 访问本级数据库，各级数据库服务器之间通过数据专网进行数据交换，不同级的用户依托全军业务网和 Web 服务器进行业务处理。

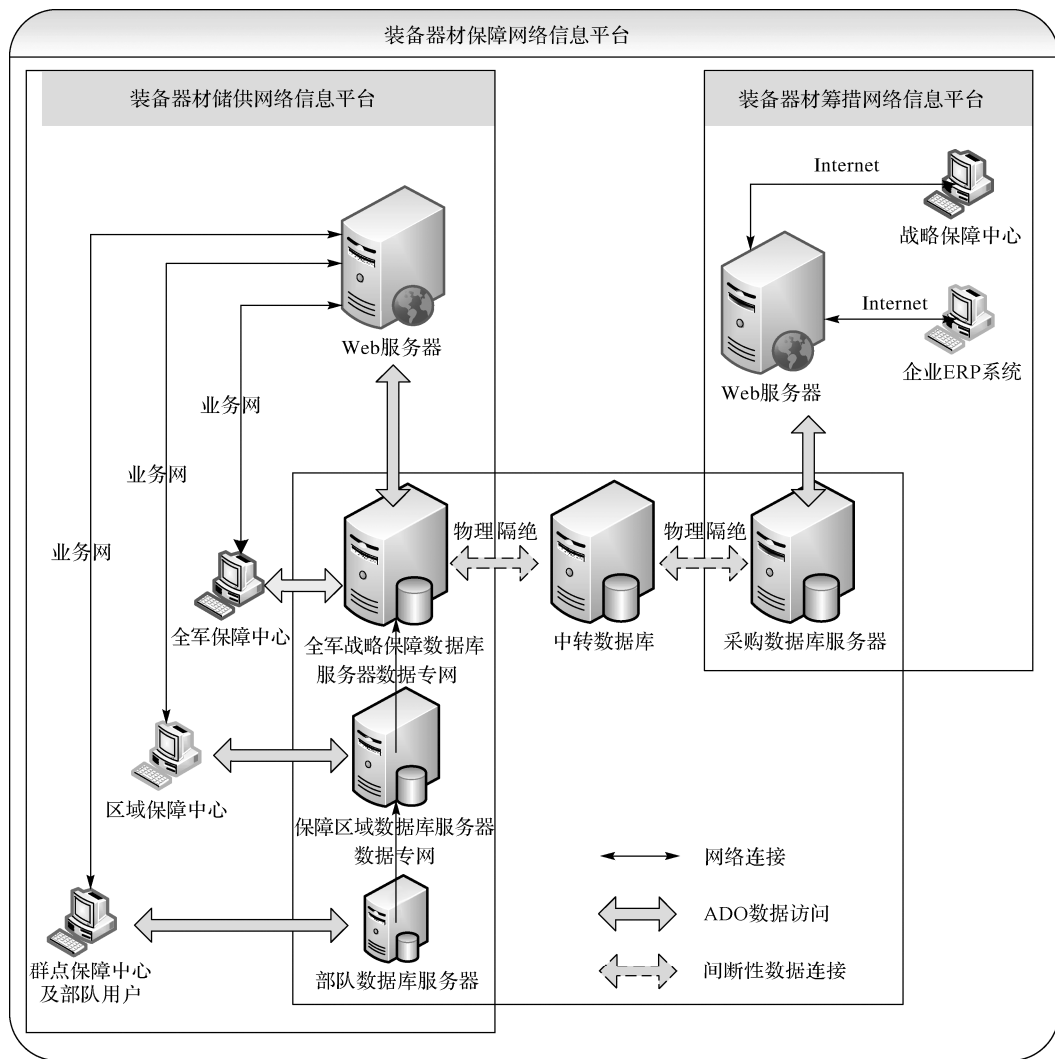


图 2.10 装备器材保障网络信息平台的网络结构简图

“装备器材筹措网络信息平台”简称“筹措平台”，是具有筹措权限的全军保障中心与供应商之间进行数据交换和信息共享的平台。全军保障中心和供应商通过 Internet 在“筹措平台”上进行业务处理，企业 ERP 系统通过预先设计的数据接口接入到“筹措平台”。为防止泄密，采购数据库服务器和全军战略保障数据库服务器之间通过中转数据库进行物理隔离，中转数据库同时只能与一个数据库相连。

2. 储供网络信息平台

装备器材储供网络信息平台网络结构示意图如图 2.11 所示。

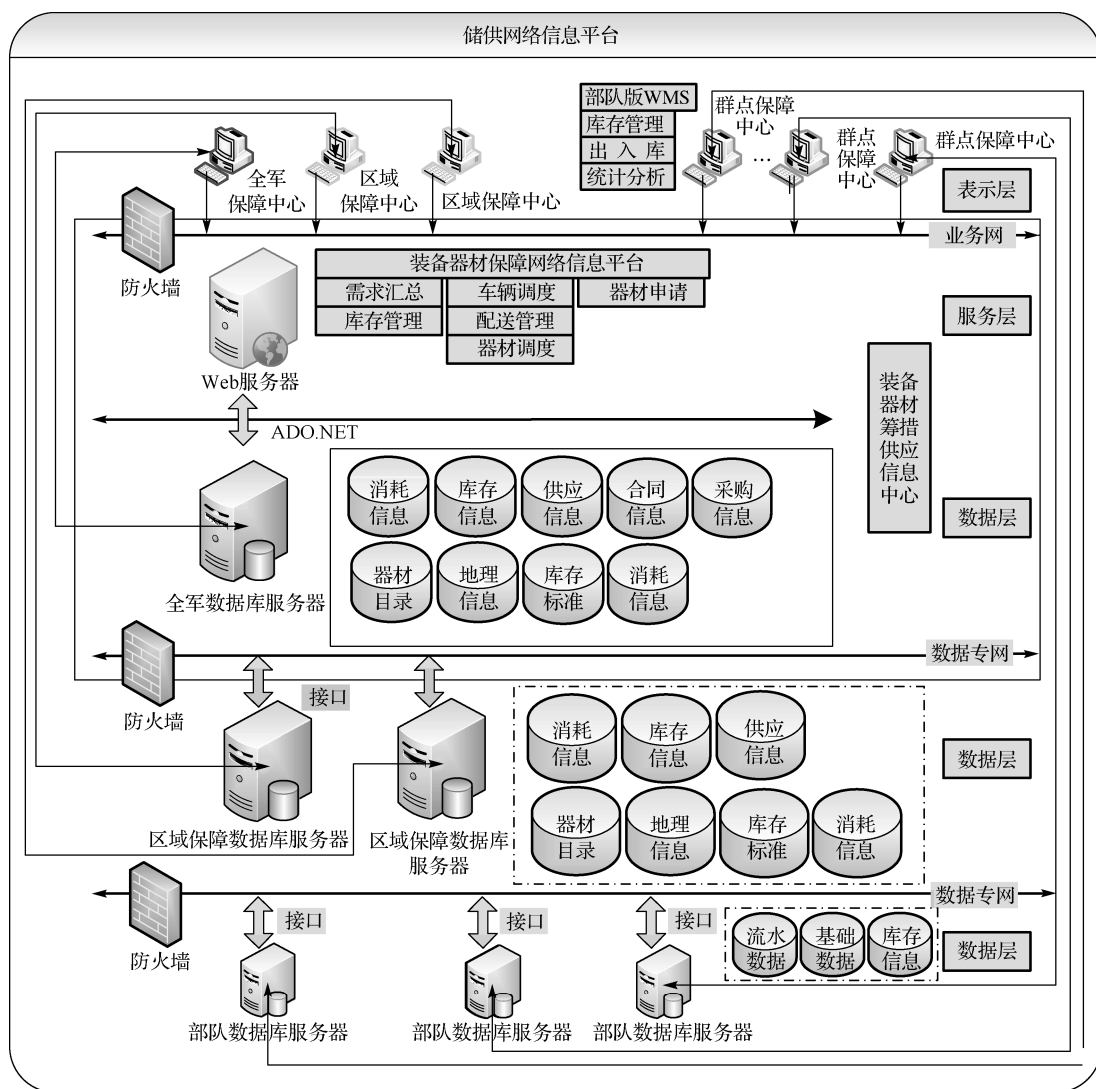


图 2.11 装备器材储供网络信息平台结构示意图

第一层：表示层，实现用户信息的查询及操作业务提交，部队需求点和各级资源点通过浏览器非常方便地查询自己的各种消耗信息、申请信息、库存标准和供应信息，以及在权限范围内查询下级单位的库存信息及申请和消耗数据，实现了内部信息共享。

第二层：服务层，Web 服务器主要提供 B/S 结构中的 Http 服务，接受下达的请求，进行相关业务的处理。服务层与数据库服务器的交互由 ADO.NET 数据库驱动来完成，以实现数据存取与业务逻辑处理的分离。

第三层：数据层，即为数据库服务器，负责提供各种数据信息的存储与管理功能，数据主要包括库存信息、采购信息、消耗信息、供应信息和保障单位基本资料信息等。

中央数据库的数据信息由信息系统从各部队的数据库中获得。在集成化保障环境中，使用 Internet/Intranet 技术开发基于 XML 的中间件接口，各保障中心和部队间可以方便、低成本的方式实现各类信息的共享，实现数据库的无缝链接，使各单位间的各项业务活动具有统一性和协调性，消除了“牛鞭效应”对器材供应的影响。全军保障中心依托 Web 服务器建立全军装备器材筹措供应信息中心，统一管理各节点上的器材申请、配送、调度等，更好地实现全军各保障单位之间信息的组织与集成。

3. 筹措网络信息平台

装备器材筹措网络信息平台网络结构示意图如图 2.12 所示。

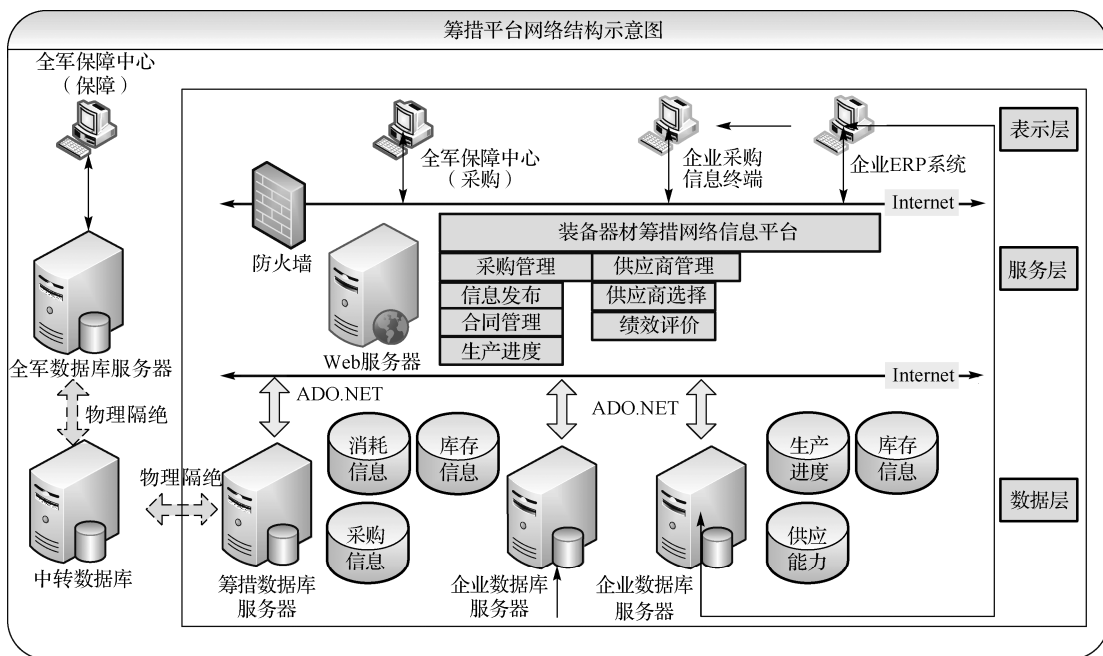


图 2.12 装备器材筹措网络信息平台网络结构示意图

“筹措平台”是全军保障中心和各备件供应商通过 Internet 进行器材采购信息共享、数据传输和业务处理的平台，与“储供平台”类似，“筹措平台”也采用三级 B/S 结构。对于建立联合库存管理关系的供应商，将企业的 ERP 系统接入到全军装备器材筹措网络信息平台，全军保障中心将相应的备件消耗信息、库存信息和采购信息向供应商开放，由供应商组织生产和储备；对于一般的供应商，在企业建立采购信息终端，由企业向军方开放企业生产能力、生产计划和生产进度信息。由全军保障中心负责对企业的生产情况进行监督和评估。

由于“筹措平台”完全依托 Internet 进行数据传输和业务处理,因此对数据的安全性要求比较高。不能直接将全军器材保障数据库向供应商开放,而要通过中转数据库,通过物理隔绝的方式进行备件数据共享。

2.3.6 保障模式的特点分析

(1) 专业合并管理

装备保障包含军械(含弹药、雷达、武器)、装甲、车船(含车辆、陆军船艇)、工化(含工程、防化)四个专业,在现行保障模式下,各专业在战术、战役、战略三级均建立了相应的器材保障力量,专业间呈现纵向并行独立的模式,存在保障力量建设分散、专业间合作协调机制缺乏、应急保障能力偏弱等不足。专业合并管理是新模式的基本特征之一,新保障模式下的每个资源点均具有向各专业的器材需求单位提供器材保障的能力。实行专业合并管理,一方面减少了重复建设,另一方面为建立专业间合作协调机制提供了前提,为公用器材在各专业间流动提供了机制保障,有利于促进装备器材保障由纵向树状结构向横向网状结构转变。

(2) 分级划区保障

在组织机构上,新模式下各级组织机构独立于部队现行编制,各级保障中心与各级需求点属于保障与被保障的关系,并不存在行政关系,因而能够为灵活组织运用器材保障力量、独立进行器材保障决策、提高器材保障的服务水平提供机制上的保证;在器材筹措上,与现行筹措策略相比,新模式将筹措权限扩大到了战略、战役、战术三级资源点,减少了在需求汇总过程中产生的需求放大现象及呆滞器材产生的数量,提高了器材筹措的灵活性;在器材存储上,受益于保障中心有独立的决策能力及器材调剂机制,各级保障中心的器材库存结构得到优化;在器材供应上,各级保障中心都有十分明确的供应对象和供应原则,全军保障中心主要负责向区域保障中心支援保障,区域保障中心则负责适时向群点保障中心补充器材,群点保障中心直接面向器材需求点配送所需器材,各级保障中心分工、协同完成全军范围内的装备器材保障任务。

(3) 综合集成运行

在保障力量上,各级保障中心都有独立的存储、运输调度、装卸载能力,每个保障中心都是功能综合集成的保障实体,提高了平时条件下装备器材保障的服务保障水平及应急条件下的快速反应能力;在业务处理上,在平时实行区域内建制保障为主、调剂保障为辅的器材保障策略,在战时实行跨区域联合保障策略,通过器材调剂机制,能够快速、灵活地实现平战结合的要求;在信息处理上,网络信息平台接入点延伸至

全军各器材需求点及各级保障中心，形成覆盖全军范围的装备器材保障信息网络，将需求、申请、调度等信息综合集成到网络环境中，利用保障网络集成办公环境。

2.3.7 区域保障模式实施策略

为适应未来一体化联合作战，我陆军装备维修正在由基于型号的维修转变为基于能力的维修，在新的维修模式下，同一条修理线可以对多个专业、多种装备进行维修作业，这也要求相应的器材保障模式必须走专业融合的路径。基于区域保障的装备器材保障模式实质上是借鉴了地方的区域物流概念，是一种“军事区域物流”保障模式。同时，装备器材保障网络的实施需要依托现有网络的各种资源，如群点保障中心可以依托于部分交通便利、地理位置好的仓库开展建设。保障模式实施将是一项非常浩大的工程，可以从以下几个方面着手。

一是体制建设。作战与装备保障相辅相成，作战离不开装备保障，装备保障离开了作战也就失去了存在的意义。目前的装备保障体制没有完全从部队的作战编制中独立出来，在一定程度上影响和制约了装备保障效能的发挥。在新的保障模式下，建立一套独立的装备器材保障编制，编制不受现行部队作战编制的制约，从而能够提供更专业、个性的装备保障服务。体制建设是新模式实施的前提条件。

二是保障业务标准体系建设。将新模式下的各级保障机构视为服务提供者，将部队现行各级修理机构视为服务需求者，各级保障中心为其提供装备器材保障服务。为此，必须有一套规范的保障业务标准体系，用于指导和规范各级保障力量的服务流程及日常保障业务。保障业务标准体系建设是新模式实施的关键环节。

三是配套力量建设。有了体制和业务标准（新模式实施的“软资源”），各项保障业务的具体实施还必须依托各项“硬资源”，即相关的配套力量建设。这里的配套力量包括各类保障设施、专业化的保障人员（如仓储管理人员、器材运输人员、信息管理人员等）力量、配送设备、信息软/硬件、网络资源等。配套力量建设是新模式实施的主要环节。

2.4 基于区域保障模式的装备器材保障网络分析

网络是对系统的抽象，网络化模型是研究网络特性的有力工具。对装备器材保障网络进行合理抽象、建立网络模型，是分析与优化保障网络抗毁性的基础。本节将在构建装备器材保障模式的基础上，分析装备器材保障网络的构成及特点，对装备器材保障网络进行详细描述。

2.4.1 装备器材保障网络的构成及特点

装备器材保障网络依托独立的三级组织机构运行，其形式与地方上的行政区域物流较为接近。通常，描述一个网络的构成都是从节点和边两个方面入手的。节点在网络中通常具有某种特殊的职能或意义，例如，在物流网络中，重要的港口、物流基地、火车站在物流网络中担负着物资中转、停靠的重要职能，可以视为物流网络中的节点。边是节点的连接载体，在不同网络中有不同的含义，例如，在道路交通网络中，边代表铁路、公路，在通信网络中，边代表通信线路。首先给出装备器材区域保障网络的定义，如下。

定义 2.8 装备器材区域保障网络 定义为区域保障模式下的装备器材保障网络，简称装备器材保障网络，是指以各级保障中心等保障实体和港口、火车站、机场等中转实体及各需求点为网络的节点，以连接实体的各类运输保障通道（铁路、公路、航线等）为网络的边，以装备维修器材为传输对象，在时间和空间上满足一定传输性质的网络。

接下来，具体阐述装备器材保障网络的构成及特点。

1. 节点

网络节点是保障网络中连接器材供应线路的节点，也是供应线路的起点和终点。这里，把所有的保障实体、交通枢纽及被保障实体抽象为节点。保障实体指各级保障中心（全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心）；交通枢纽包括火车站、汽车站、港口码头等，通常可以将某个城市作为交通枢纽，例如，可以说郑州市是中国物流网络的一个交通枢纽；被保障实体，这里特指部队需求点，主要是保障网络中的各级修理单位和部队器材仓库。

按照保障任务的属性，把保障网络中的节点分为三类：保障节点、连接节点、需求点。

（1）保障节点。在保障网络中，具备器材物资接收或发送能力的节点称为保障节点，具体包括全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心。

（2）连接节点。在保障网络中，所有不具备器材物资接收或发送能力的节点称为连接节点，它们的作用是转运资源，作为中转站而存在，这类节点主要指重要车站、港口等交通枢纽。

（3）需求点。指器材消耗单位，本书特指各级部队的修理单位和队属仓库。

2. 边

装备器材保障网络中的各节点通过公路、铁路、水路、航线等方式连接在一起，

形成保障物资输送的路网载体。按照边的性质，将装备器材保障网络分为公路网、铁路网、航空网络和水路等。

网络边采用择近、择优选取的原则。通常情况下，网络节点之间存在多条路线，特别是在公路网络中，两个保障实体之间有多条公路可以直达，而这种多重边的网络非常不利于学术研究和相关计算。为了构建利于计算的网路，当两个节点之间有多条直达路径时，综合考虑容量、负载能力、安全性等多方面因素，选择距离比较近、等级比较高（容量大、速度快、安全性高、费用少）的公路作为两个节点之间的边。

3. 层次性特征

从前面的分析可知，装备器材保障网络实质上是一种以道路交通网络为主体的军事物流网络，网络中的节点同时包含军事设施和一般设施，网络中的物资流是用于军事保障目的的装备器材。与一般的道路交通网络一样，装备器材保障网络对外表现出自身的网络拓扑结构，它们主要是网络中的保障设施（如各级仓库）和基础设施（如交通中转枢纽）及连接各节点的交通道路（如铁路、公路等），这是网络的物理层，所对应的网络称为物理网络。通常情况下，物理层的网络拓扑结构相对比较稳定，不容易遭到破坏。另外，装备器材保障网络是一个业务网络，该业务网络是一个非常态的网络，即只有当网络中有器材需求，保障资源点向需求点运输器材时才存在。因此，业务网络实际上是物理层网络的一个子网络，它由若干器材运输方案构成，当网络受到外界扰动时，业务层最容易受到影响，为了消除这种影响，通常需要制定相应的抗干扰策略。

因此，可以将装备器材保障网络分为物理网络和业务网络。业务网络是装备器材保障网络的应用层（或功能层），物理网络是装备器材保障网络的支撑层，业务网络运行在物理网络之上，物理网络对业务网络起支撑作用，物理网络的拓扑结构完整性会直接影响保障业务的运行。装备器材保障网络的层级划分如图 2.13 所示。

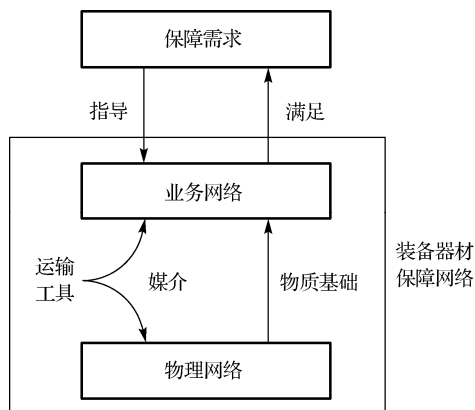


图 2.13 装备器材保障网络的层级划分

2.4.2 装备器材保障网络的网络模型

研究网络的性能及其变化,首先建立相应的网络模型,通常有两种方法^[107]。一种方法是对实际网络进行简化、抽象,提炼出需要的网络模型。这种方法的特点是模型来源于实际网络,构建的网络模型与实际网络比较接近。另一种方法是根据实际网络的网络特性,利用计算机自动生成符合该网络特性的网络模型。这种方法的特点是灵活、快捷,适合大型网络研究,但构建的网络模型与实际网络的吻合程度通常难以保证。装备器材保障网络是一种以道路交通网络为主的军事物流网络,更适合采用第一种方法进行描述。

装备器材保障网络涉及公路运输、铁路运输等多种运输方式,这些运输方式在连接节点处通过器材中转发生联系,在中转过程中要付出费用、时间等代价。另外,器材从保障资源点出发,需要装载时间、费用等,器材到达需求点后,需要卸载时间、费用等。将中转产生的相关代价关联到连接节点上,将装载代价关联到保障资源点上,将卸载代价关联到需求点上,同时将器材在运输过程中产生的费用、时间等运输代价关联到网络的边上,这样就构成了一个节点和边都有相应权重的多式联运网络。

目前,构建多式联运网络时主要采用在非同质网络之间直接增加连接边的方法^[108],在解决不同网络衔接问题的同时,不仅极大地增大了网络的规模,而且这种方法难以直接反映运输中转过程。因此,本书采用一种基于空间扩展的建模与分析方法^[107]构建装备器材区域保障网络。下面以一个实际的例子来说明基于空间扩展构建网络模型的基本思想。

假设某区域内有一个群点保障中心,另外还分布着火车站、港口、机场、高速公路收费站、河流等运输通道和重要的交通枢纽节点,该区域内道路交通及保障设施分布如图 2.14 所示。

由图可知,保障通道主要有普通公路、高速公路、河道、铁路、航空,主要交通枢纽包括火车站、高速公路出入口、机场、港口。在构建保障网络模型时,应当考虑模型的分辨率:分辨率太高则导致网络规模极大,缺乏可计算性;分辨率太低又不能完整表达器材在网络上的传输能力,导致网络模型失真,不能很好地反映装备器材保障网络的基本性质和基本能力。

选取保障中心、港口、火车站、高速公路出入口、机场作为网络节点,综合考虑容量、时延、可靠性、费用等因素,选择两个节点间综合评价价值最高的路径作为网络的边。假设所有实体之间都能通过公路实现连接,则抽象后的区域保障网络几乎是全连通网络,网络上的边和节点都具有运输代价、中转代价等附加属性,初步抽象的保障网络如图 2.15 所示。

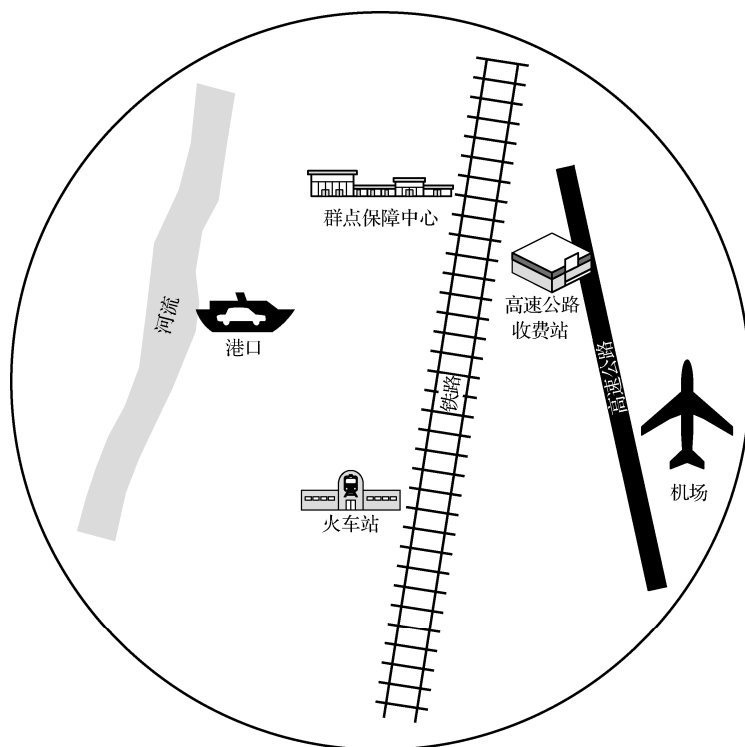


图 2.14 某区域内道路交通及保障设施分布

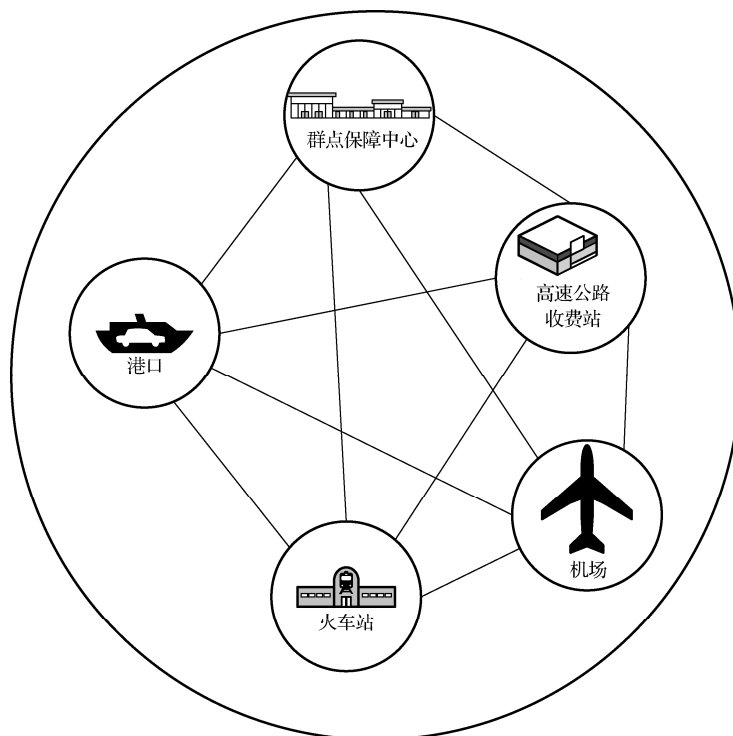


图 2.15 初步抽象的保障网络

为了得到更易于计算的网络，这里采用基于空间扩展的建模与分析方法构建网络模型，首先对保障资源点进行扩展，扩展后包括一个扩展的普通公路节点，连接两个节点的边表示保障器材出入库、中转的过程，扩展后的保障网络如图 2.16 所示。

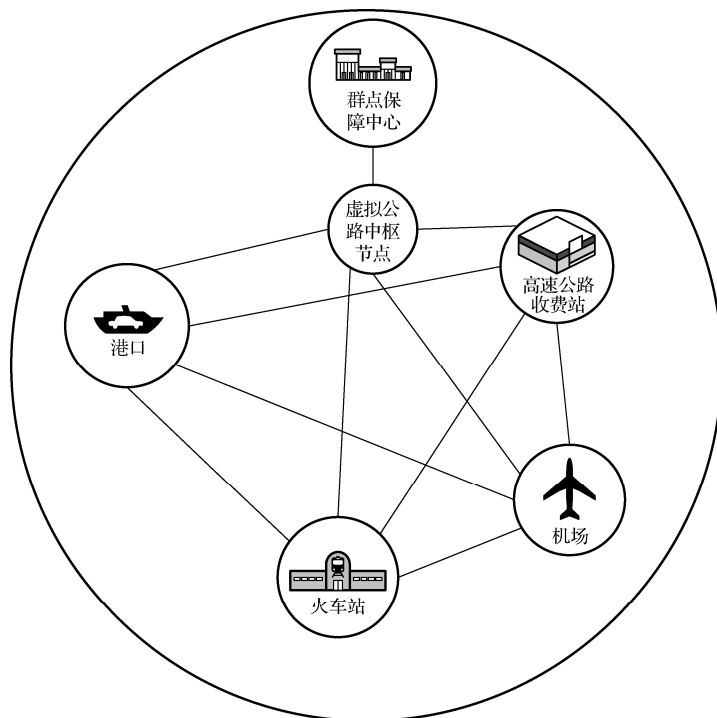


图 2.16 扩展后的保障网络

一般来说，港口-火车站、港口-机场、火车站-机场等通过普通公路连接，相对于整个器材保障网络来说，某个小区域中很小范围内的器材中转更关心中转过程所需要的运输时间、费用，几乎可以忽略小范围内的运输时间、费用。因此，把区域内所有普通公路节点收缩到一个虚拟节点，虚拟节点到保障中心、港口、火车站、机场、高速公路出入口的边则表示中转过程，得到简化的区域保障网络，如图 2.17 所示。

上面针对某一特定区域的网络生成过程进行了分析，将所要研究的整个目标区域划分为若干小区域，每个小区域都应用上面的方法构建保障网络模型，然后再将各个小区域的保障网络合并起来，就得到了整个目标区域的保障网络模型。为了描述方便，以下如无特殊说明，装备器材保障网络均指采用基于空间扩展的建模与分析方法抽象得到的网络。

为了便于研究和计算，将所得网络图中的节点按一定规则编号，全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心、需求点和连接节点分别以 L1-、L2-、L3-、L4-、L5- 开头，后面为 1 到 N 的阿拉伯数字，例如，编号 L2-1 代表第 1 个区域保障中心。然后将全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心、需求点按照从里到外的顺序呈辐

射状排列在一个同心圆中，连接节点则随机分布在圆环内部，节点间的连接关系保持不变。图 2.18 所示为最终的网路图及与实际路网中各节点的映射关系。

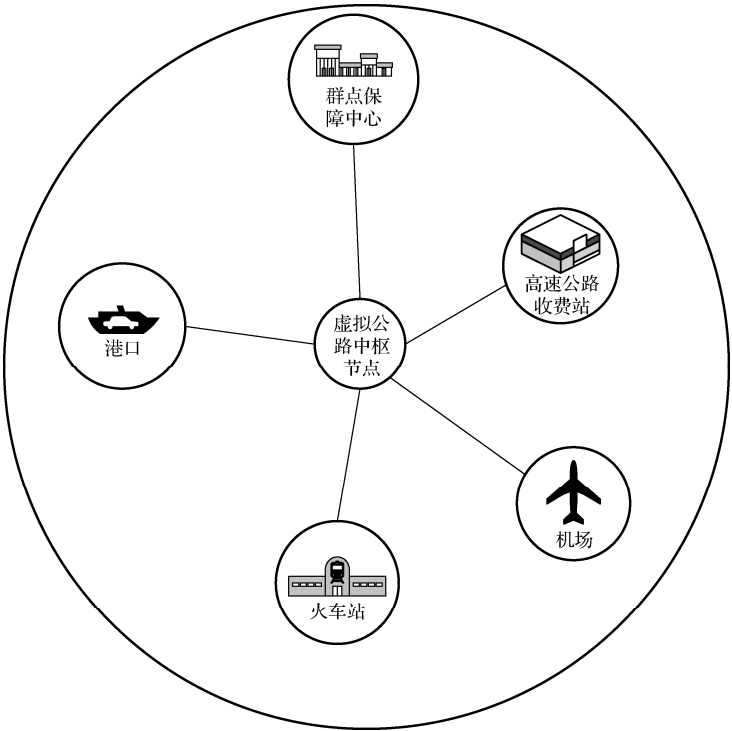


图 2.17 简化的区域保障网络

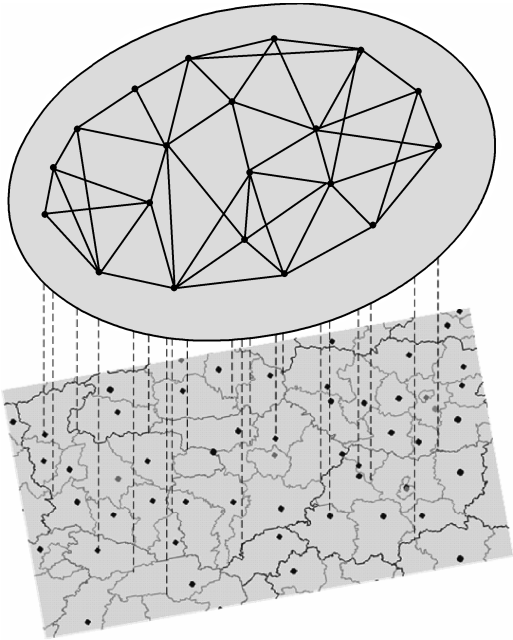


图 2.18 最终的网路图及与实际路网中各节点的映射关系

通过上述分析可以知道,构建装备器材保障网络的关键是确定各级保障中心的位置及相互关系,这是因为对于某一特定的地域范围来说,网络中的需求点(部队修理单位及器材仓库)、连接节点(火车站、机场、码头等)及边(实际的公路、铁路等)均为已知,只需要确定在该区域中建立多少个保障中心、建立什么级别的保障中心,以及确定保障中心之间的建制关系,然后按照基于空间扩展的建模与分析方法,就可以构造出完整的网络模型。因此,本书将在第3章重点研究装备器材保障网络中各级保障中心的选址方法。

2.4.3 装备器材保障网络的设计要求

保障模式可视为保障网络的概念模型,对网络运行的机制、环境等进行了概念建模,而保障业务最终是运行在网络环境下的,因此,需要将保障模式(概念模型)转变为保障网络(物理模型)。在网络设计阶段,需要着重考虑以下三个方面。

(1) 区域划分粒度适度

新模式实施划区保障,因而首先面临的问题是在全军范围内划多少个区合适,每个区所保障的范围是多大,也就是区域划分的粒度问题。区域划分粒度过细,保障区域划分数量过多,每个资源点的保障范围较小,能降低网络运行成本,但资源点数量与保障区域数量成正比,势必导致建设成本的增加;区域划分粒度过粗,保障区域划分数量过少,网络建设成本降低了,但是由于每个资源点的保障范围过大,势必导致网络运行成本增加。因此,确定合适的区域划分粒度,对保证网络前期建设成本与后期运行成本具有非常重要的作用,其核心在于确定适度的各级保障中心数量及位置分布。在这个过程中,一方面要充分利用专家经验等非量化的指标,另一方面又要建立科学合理的选址模型,做到定性与定量相结合。

(2) 各级保障中心选址分级实施

装备器材保障网络中的资源点包含全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心三级,它们在职能分工上各有偏重,在选址时考虑的因素也不完全一致,因而应当分级实施选址。全军保障中心是全军装备器材保障的具体指挥、调度、决策中心,对上落实总部业务机关关于装备器材保障的指令,对下统管全军装备器材保障工作,是装备器材保障的业务中枢和信息处理中枢,因此,应当选择信息通信发达、道路交通运输网络抗毁性高的一线城市作为保障中心开设地点。区域保障中心是本区域范围内装备器材保障的指挥、调度、决策中心,在整个保障网络中也属于数量少、作用大的枢纽节点,因此,在开设地点选择上一方面应当选择本区域范围内信息通信发达、道路交通运输网络抗毁性高的城市,另一方面考虑区域保障中心与各群点保障中心的位置分布关系,

与各群点保障中心的平均距离要小。群点保障中心是最直接的保障实体，负责向各需求点配送器材，具有配送频度高、单次配送器材量小的特点，因此，在选址时应重点考虑与各需求点的平均最短距离，减少配送过程中产生的旅行成本。

（3）保障网络运行经济性与抗毁性并存

装备器材保障网络有双重“身份”，一方面，它在本质上属于物流配送网络，物流配送网络在设计过程中通常以网络运行成本的经济性为主要考虑因素，另一方面，它是军事保障网络，军事保障网络在设计过程中必须要考虑未来恶劣的生存环境，将网络抗毁性纳入其基本设计指标体系中。因此，装备器材保障网络设计应兼顾在平时条件下网络运行成本的经济性和战时条件下网络的抗毁性。

2.5 本章小结

本章是本书的研究基础，为后续研究树立了研究对象。在分析现有保障模式特点、总结现有保障模式不足的基础上，以“四合四统”理念、抗毁性要求、经济性要求及信息处理要求为基本原则构建装备器材区域保障网络，详细论述了网络中各级组织机构的职能、平时和战时的业务流程及特点、信息处理机制。为了便于后面对保障网络设计、抗毁性分析及优化进行深入研究，本章从定性分析的角度阐述了装备器材保障网络的构成及特点，明确了保障网络在设计过程中对经济性和抗毁性的要求。

本章所构建的基于区域保障的装备器材保障网络与目前的保障模式相比，具有专业合并管理、分级划区保障、综合集成运行的特点，符合装备保障“四合四统”的基本特征。所构建的保障模式从理论层面探讨了优化装备器材保障军事效益的方法和途径，对改革与创新装备器材保障理论、探索装备器材保障方法具有一定的借鉴意义。

第3章 装备器材保障网络设计关键技术

第2章主要对保障模式进行了研究,并对保障网络的结构进行了定性描述和分析。根据装备器材保障网络的定义,构建装备器材保障网络的关键环节是如何确定各级保障中心的位置。因此,全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心三级资源点选址方法是装备器材保障网络设计的关键技术。在保障网络设计过程中,主要考虑平时条件下网络运行成本的经济性和战时条件下(或应急条件下)保障网络的抗毁性,本章将从这两个方面对各级资源点的选址方法进行深入研究。

本章内容安排如下:首先,分析装备器材保障网络选址问题,明确选址对象和研究思路与方法;其次,基于群决策理论确定候选保障中心;接着,建立基于双层混合整数规划的选址模型,确定资源点与需求点的最终服务关系;最后,通过具体的算例对所设计的选址模型和算法进行验证。

3.1 装备器材保障网络设计关键技术分析

3.1.1 研究对象分析

由装备器材保障网络的定义可知,保障网络由节点、边及承载对象构成,其中,节点和边属于在网络设计阶段需要研究的内容。通过第2章中对装备器材保障网络特点的分析可知,网络中含有三类节点,第一类是保障节点,第二类是连接节点,第三类是需求点。这三类节点中,需求点信息(包括需求点的数量、地理位置分布)是确定的,同时假设某段时间内需求点的平均器材需求量也是确定的;连接节点代表重要的交通枢纽,如重要的港口城市、铁路车站等,它们存在于实际路网中,也是确定的;保障节点是本书所提出的模式中的一类新节点,具有不确定性,包括保障节点的数量、位置及保障节点与需求点之间的服务和被服务的关系;网络中的边指实际路网中主要的交通道路,也是确定的。因此,设计装备器材保障网络的关键环节是确定网络中各级保障中心的相关信息,即全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心选址理论与方法是装备器材保障网络设计的关键技术。

3.1.2 研究问题分解

保障节点包含全军保障中心、区域保障中心和群点保障中心，三类保障节点之间是保障与被保障的关系，同时它们又都是要选址的对象，因此，这是一个典型的多级选址问题。同时研究这三类保障节点的选址问题，即在一个模型中包含三个层次的选址对象，即使能够建立数学模型，在模型求解阶段也会遇到相当大的阻力，甚至无法求解。鉴于此，将需求点和保障节点放在一起考虑，构建它们的上下级关系：需求点—群点保障中心—区域保障中心—全军保障中心。可以发现，在这个关系链中，任何相邻两个节点之间都是服务与被服务的关系，例如，对于“需求点—群点保障中心”而言，需求点是服务接受者，群点保障中心是服务提供者，对于“群点保障中心—区域保障中心”而言，群点保障中心是服务接受者，区域保障中心则是服务提供者，对于“区域保障中心—全军保障中心”而言，区域保障中心则是服务接受者，全军保障中心则是服务提供者。因此，假设这样一种网络，网络中只有两类节点，一类是服务接受节点（需求点），另一类是服务提供节点（保障设施节点），研究该网络中保障设施的选址方法。很显然，将该方法分别依次运用到“需求点—群点保障中心”“群点保障中心—区域保障中心”“区域保障中心—全军保障中心”选址问题中，就可以完成整个装备器材保障网络的保障节点选址问题。选址问题的研究思路如图 3.1 所示。

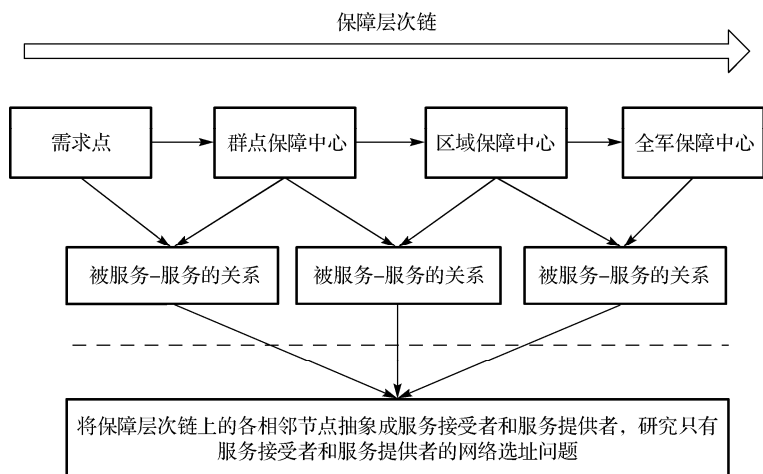


图 3.1 选址问题的研究思路

3.1.3 研究总体思路

用 $G=(V,E)$ 表示所要研究的网络，其中 $E=\{e_{ij}\}$ 表示网络中的边集合， $V=\{v_i\}$ 表示网络中的节点集合。 e_{ij} 表示资源点 i 向需求点 j 提供服务，因此，网络中的边代表

的是服务与被服务的关系。节点集合包括服务接受者和服务提供者，通过下标进行区分，即 $V = \{v_{ti}, v_{pi}\}$ ，其中 v_{ti} 代表第 i 个服务接受者， v_{pi} 代表第 i 个服务提供者，其中服务接受者在网络中的位置信息、数量信息、需求信息已知。选址优化是为了从候选集合中确定具体的服务提供者，包括服务提供者的位置分布、每个服务提供者与服务接受者的关系，目的是使得所构建的保障网络兼顾抗毁性和运行成本的经济性。

本书所设计的装备保障中心两阶段选址方法的总体思路如图 3.2 所示。

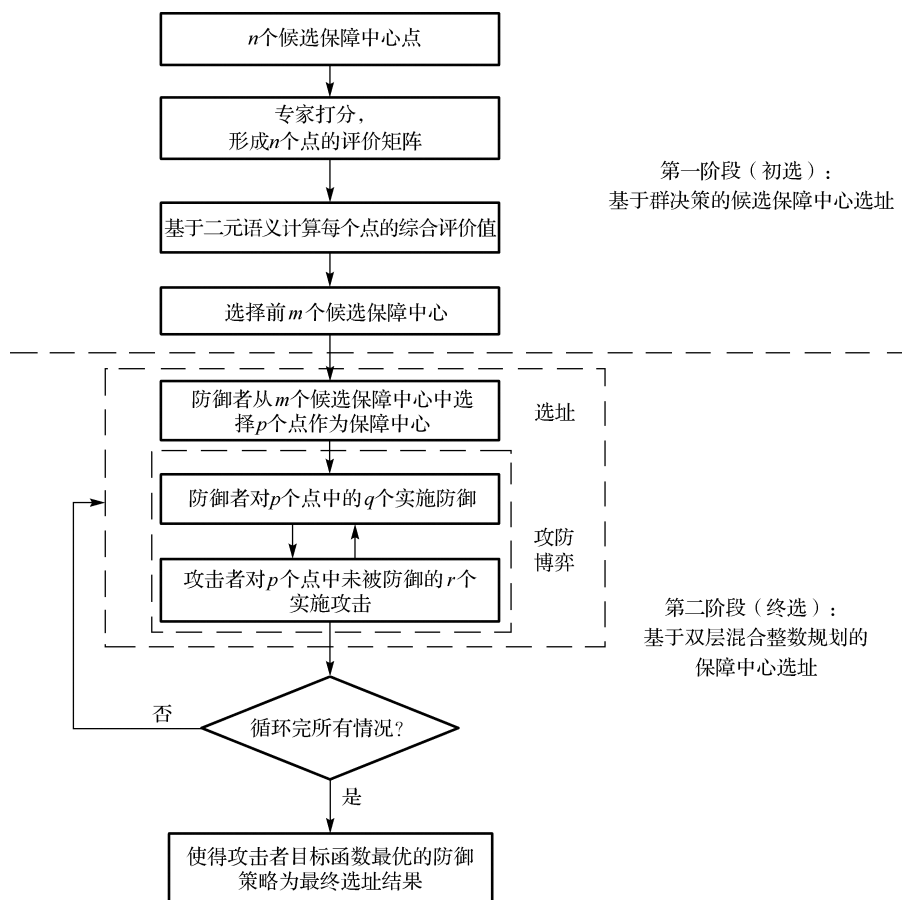


图 3.2 两阶段选址方法的总体思路

抗毁性是选址过程中重点考虑的因素，应将抗毁性设计要求贯穿选址的整个过程中。将保障中心选址分为两个阶段，第一阶段基于群决策理论，构建网络选址抗毁性指标，专家为包含 n 个候选资源点集合中的每个资源点的各项抗毁性指标打分，通过二元语义转换、权重计算等步骤，得出每个候选资源点的综合评价值，将各候选资源点按照综合评价值由高到低的顺序排序，取前 m 个作为第一阶段的选址结果。第二阶段基于双层混合整数规划模型，将第一阶段的选址结果作为第二阶段的候选保障中心

集合,考虑攻击与防御,模型分上、下两层。上层代表防御者,防御者从 m 个候选保障中心中选择 p 个点作为保障中心开设基点。防御与攻击资源有限,双方都不能对所有保障设施全部防御或全部攻击。防御者从 p 个点中选择 q 个防御,目标是使网络运行成本最低。下层代表攻击者,其目标是从 p 个点中选择 r 个攻击,使网络运行成本最高。上、下两层围绕网络运行成本展开攻防博弈,模型的最终结果是选择攻击者目标函数最优时对应的上层模型的防御策略,即网络遭受最大攻击情况下的选址结果作为保障中心的最终选址结果。

在第一阶段,从指标的构建上考虑了抗毁性设计要求,在第二阶段,虽然模型的目标是围绕网络运行成本构建的,但是由于模型中引入了攻击与防御,因此实质上第二阶段也考虑了抗毁性设计要求。

3.2 基于群决策的候选保障中心选址决策

3.2.1 候选保障中心选址评价指标体系

为使构建的保障网络具有良好的抗毁性,分别从自然条件、交通条件、安全条件、公共设施条件和政治及经济环境5方面考虑选址评价指标体系的构建。下面详细分析各方面所考虑的具体因素,并在此基础上构建选址评价指标体系。

(1) 自然条件

自然条件通常包括气象条件、地质条件、水文条件、地形条件等,选择自然条件良好的区域开设基点,能有效地提高全军保障中心应对地质灾害(如地震、洪水等)的能力。

(2) 交通条件

器材运输供应是装备器材各级保障中心的主要业务之一,保障中心必须具备方便的交通条件,靠近主要公路、铁路、货运航线,增加应急条件下可供选择的运输方式,有效提高保障中心应急条件下的器材保障能力。

(3) 安全条件

在战时条件下,任何一个保障中心均可能成为敌人为达成战略目的而实施火力打击的对象,因此,在保障中心选址时,必须将安全条件作为选址的基本考虑因素。可从两方面考虑安全条件,一是自然条件提供的隐蔽能力和防御能力,二是人为部署的防卫力量。通常选择隐蔽能力和防御能力较好的地域作为保障中心开设基点,保障中

心自身可配备一定的防卫力量,开设基点附近的驻地部队(特别是防空部队)也是为保障中心提供安全条件的重要来源。

(4) 公共设施条件

公共设施条件涉及区域内的电力供应能力、信息通信能力、物流服务能力等。

(5) 政治及经济环境

保障中心的正常运行需要稳定的政治环境及发达的经济环境作为支撑。

根据以上分析,构建候选保障中心选址评价指标体系如图3.3所示。

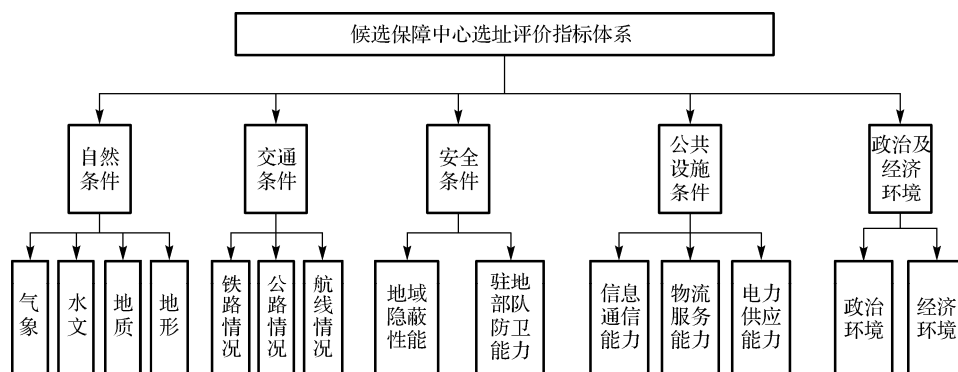


图 3.3 构建候选保障中心选址评价指标体系

从第2章中关于装备器材保障网络设计要求的相关论述中可以知道,三级保障中心由于职能分工的侧重点不同,在选址时所考虑因素的侧重点也不同,三级保障中心选址应分级实施,各级保障中心对各指标的要求如表3.1所示。

表 3.1 各级保障中心对各指标的要求

指 标	子 指 标	全军保障中心	区域保障中心	群点保障中心	说 明
自然条件	气象	√	√		全军保障中心和区域保障中心在网络中的地位至关重要,开设地点不能选择在容易发生洪涝灾害及地震易发的地带,对气象、水文、地质、地形均有要求;对于群点保障中心,建设规模小、保障范围不大,应适当考虑自然条件对选址的影响
	水文	√	√		
	地质	√	√		
	地形	√	√	√	
交通条件	铁路情况	√	√		对于全军保障中心,器材运输量大,需要通过铁路、公路及航线多种运输方式提供保障;对于区域保障中心,范围相对较小,可考虑铁路和公路联合运输保障;对于群点保障中心,单次运输量小、器材运输频繁,主要考虑公路运输
	公路情况	√	√	√	
	航线情况	√			
安全条件	地域隐蔽性能	√	√	√	在战时,三级保障中心的重要性不仅与建设规模有关,还与保障中心所处的位置、战斗(役)中所担负的职能等具体情况有关,因此,三级保障中心在战时均可能成为敌方攻击的对象,需综合考虑地域隐蔽性能及驻地部队防卫能力
	驻地部队防卫能力	√	√	√	

续表

指 标	子 指 标	全军保障中心	区域保障中心	群点保障中心	说 明
公共设施条件	信息通信能力	√	√	√	由于器材运输批量大, 全军保障中心、区域保障中心需要大量借助地方物流运输企业的力量, 实施军民联合保障, 而群点保障中心由于保障范围较小, 依靠自身运输力量即可; 三级保障中心依托网络信息平台处理各种业务, 选址区域的信息通信能力和电力供应能力是必要因素
	物流服务能力	√	√		
	电力供应能力	√	√	√	
政治及经济环境	政治环境	√	√		鉴于全军保障中心和区域保障中心在整个保障网络中占据重要地位, 必须考虑选址区域的社会整体情况是否稳定、经济发展水平是否先进
	经济环境	√	√		

注: “√”表示该项指标作为某保障中心选址时的考虑因素。

3.2.2 语言型多指标群决策问题

1. 语言型多指标群决策

在多指标群决策问题中, 由于受决策者的知识结构、判断水平、个人偏好等主观因素及事物本身的模糊性、不确定性、复杂性的影响, 在实际的决策问题中, 通常表现为决策信息具有模糊性和不确定性, 决策者常用诸如“很好、满意、重要、一般、较差”等语言形式给出定性的决策信息。许多研究人员针对这种语言评价信息类型的多指标群决策问题展开了深入研究, 并逐渐形成了一个新的研究方向: 语言型多指标群决策。语言型多指标群决策问题作为多指标群决策科学的一个分支, 其理论和方法尚未完全成熟, 然而由于在群体语言决策过程中, 决策者的评价信息以自然语言短语给出, 其更接近实际性, 且决策者给出的评价信息更具有真实性、准确性, 对于难以定量的大系统问题的作用极为突出, 因而语言型多指标群决策问题近些年来得到国内外学者的广泛关注, 也取得了许多研究成果。目前语言型多指标群决策理论和方法已经被应用于解决各种实际问题, 在工程、经济、管理和军事等诸多领域中有着广泛的应用, 如投资决策、项目管理、维修服务、武器系统性能评定、设施选址、投标招标和经济效益综合评价等。

语言型多指标群决策问题可以描述为: 设 $X=(x_1,x_2,\cdots,x_m)$ 为备选方案集, $F=(f_1,f_2,\cdots,f_n)$ 为方案的指标集, $\lambda=(\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_n)$ 为指标的权重集, $D=(d_1,d_2,\cdots,d_g)$ 为决策专家集, $P=(P^1,P^2,\cdots,P^g)$ 为 g 个决策专家的判断矩阵集合, 其中 $P^k=(P_{ij}^k)_{m\times n}$, P_{ij}^k 表示第 k 个专家对 i 方案在第 j 个指标下的评判, 为一语言短语, 即 $P_{ij}^k\in S_T$, S_T 为语言短语集, $1\leq k\leq g$, $1\leq i\leq m$, $1\leq j\leq n$, 且 $\sum_{j=1}^n\lambda_j=1$ 。通过运算, 要求选择综合评价价值最高的一个方案。

在决策过程中, 由于决策问题本身具有模糊性和不确定性, 决策者最好的表达方式就是自然语言。在决策过程中, 决策者往往从给出的自然语言评价集中选择合适的自然语言评价等级来表示相应的偏好。自然语言评价集 H 一般是由奇数个预先定义好的语言短语元素组成的集合, 由于实际决策问题具有多样性, 各语言短语的实际含义不同, 这里统一定义自然语言评价等级为 $H = (H_0, H_1, H_2, \dots, H_{2i})$, 并且 H 有以下属性^[109]。

① 有序性: $i > j \Leftrightarrow H_i > H_j$, 这里“ $>$ ”表示“优于”。

② 可逆性: 存在一个逆算子 NEG , 当 $i + j = 2t$ 时, 有 $H_i = \text{NEG}(H_j)$, 这里“ $=$ ”表示“等于”。

③ 极值运算: 当 $i < j$ 时, 极大值 $\max(H_i, H_j) = H_j$, 极小值 $\min(H_i, H_j) = H_i$, 这里“ $<$ ”表示“劣于”。

自然语言评价集往往可以表示许多决策信息, 如决策指标值、权重系数等, 因此, 语言决策问题在实际中应用得很普遍。自然语言评价在现实决策问题中的应用引起了对语言信息集结运算理论的广泛研究。总体上说, 目前存在着三种语言信息处理模型^[110]。

(1) 基于扩展原理的近似运算模型

基于扩展原理的近似运算方法是将语言值转换为模糊值进行运算, 语言集结运算模型可表示为

$$S^n \xrightarrow{\tilde{F}} F(R) \longrightarrow \begin{cases} \xrightarrow{\text{app}_1} S \\ \xrightarrow{m} R \end{cases}$$

这里 $S = (S_0, S_1, S_2, \dots, S_{2t})$ 是预先给定的语言评价集, S^n 表示 S 的 n 维笛卡儿乘积, \tilde{F} 是一个基于扩展原理的集结算子, $F(R)$ 是实数 R 上的模糊集, app_1 是语言近似方法, m 是模糊集的排序方法。

(2) 语言值直接运算的语言符号集结模型

语言值直接运算的语言符号集结方法是利用语言评价集的有序结构对语言标度值直接进行运算, 这种符号集结模型可表示为

$$S^n \xrightarrow{C} [0, g] \xrightarrow{\text{app}_2} \{0, 1, \dots, g\} \longrightarrow S$$

这里 C 是符号语言集结算子, app_2 是近似函数。

(3) 二元语义信息处理方法的分析模型

二元语义信息处理的方法是利用二元语义表达形式及它的特性对语言值进行运算, 这种分析模型可表示为

$$S^n \xrightarrow{H} (S \times [-0.5, 0.5])^n \xrightarrow{T} S \times [-0.5, 0.5]$$

这里 H 是转换函数, 它将自然语言转换成二元语义形式, T 是二元语义运算算子。

在以上三种语言信息处理模型中, 基于扩展原理的近似运算模型需要事先假设模糊数的隶属函数, 而且根据扩展原理在进行模糊数运算时往往进一步增加了模糊性, 在一定程度上会造成信息损失或扭曲。另外, 模糊数的运算结果通常与初始语言评价信息没有直接联系, 很难让决策者理解决策分析结果的具体含义; 在语言值直接运算的语言符号集结模型中, 由于事先定义的语言评价集是离散的, 语言信息经运算后, 很难精确地对应初始的语言评价信息集, 通常需要寻找一个最贴近的语言短语进行近似, 也会产生信息损失; 而对于二元语义信息处理方法的分析模型, 采用二元语义表示语言评价信息并进行运算, 可有效避免语言评价信息集结和运算中出现的损失与扭曲, 也使语言信息计算结果更为精确。因此, 本书重点研究和探讨基于二元语义的语言型多指标群决策问题。

2. 二元语义相关概念

(1) 二元语义

二元语义是一种基于符号转移概念的语言信息处理方法, 是指针对某指标 (或方案) 给出的评价结果, 由 (S_k, α) 表示语言评价信息的二元组^[110,111]。其中, S_k 为语言评价集 S 中的第 k 个元素, 表示语言评价集中的语言短语或符号; $\alpha \in [-0.5, 0.5]$, 表示由计算得到的 (S_k, α) 与初始语言评价集 S_k 中最贴近的语言短语之间的偏差。

例如: 假设在语言评价集 $S = (S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6)$ 上进行一个集结运算, 其结果为 $\beta = 2.7$, 那么这个信息用二元语义形式表示为 $\Delta(2.7) = (S_3, -0.3)$, 符号转移计算的例子如图 3.4 所示。

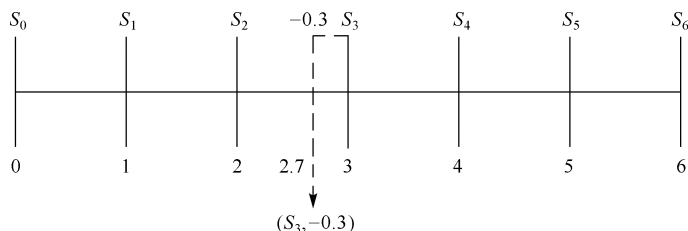


图 3.4 符号转移计算的例子

定义 3.1 设 $S_i \in S$ 为语言短语, 则其相应的二元语义可通过如下转换函数 θ 得到

$$\theta: S \rightarrow S \times [-0.5, 0.5)$$

$$\theta(S_i) = (S_i, 0), S_i \in S \quad (3.1)$$

定义 3.2 设语言评价集 $S = (S_0, S_1, S_2, \dots, S_T)$, $\beta \in [0, T]$ 是一个数值, 表示语言符号集结运算的结果, 则与 β 相应的二元语义可由如下函数 Δ 得到

$$\Delta: [0, T] \rightarrow S \times [-0.5, 0.5)$$

$$\Delta(\beta) = (S_i, \alpha) = \begin{cases} S_i, i = \text{Round}(\beta) \\ \alpha = \beta - i, \alpha \in [-0.5, 0.5) \end{cases} \quad (3.2)$$

式中, Round 表示四舍五入取整运算。

定义 3.3 设存在语言评价集 $S = (S_0, S_1, S_2, \dots, S_T)$, (S_i, α) 是一个二元语义, 则存在一个逆函数 Δ^{-1} , 使二元语义可转换成相应的数值 $\beta \in [0, T]$, 即

$$\Delta^{-1}: S \times [-0.5, 0.5) \rightarrow [0, T]$$

$$\Delta^{-1}(S_i, \alpha) = i + \alpha = \beta \quad (3.3)$$

性质 3.1^[110] 假设 (S_i, α_1) 和 (S_j, α_2) 为任意二元语义, 则有以下性质:

如果 $i < j$, 那么 (S_i, α_1) 劣于 (S_j, α_2) ;

如果 $i = j$, 那么当 $\alpha_1 = \alpha_2$ 时, (S_i, α_1) 和 (S_j, α_2) 表示相同的信息“相等”; 当 $\alpha_1 < \alpha_2$ 时, (S_i, α_1) 劣于 (S_j, α_2) ; 当 $\alpha_1 > \alpha_2$ 时, (S_i, α_1) 优于 (S_j, α_2) 。

存在逆算子 Neg

$$\text{Neg}(S_i, \alpha) = \Delta\{T - [\Delta^{-1}(S_i, \alpha)]\}$$

式中, $T+1$ 是集合 S 中元素的个数, $S = (S_0, S_1, S_2, \dots, S_T)$ 。

存在极大(小)运算

当 $(S_i, \alpha_1) \geq (S_j, \alpha_2)$ 时, $\max\{(S_i, \alpha_1), (S_j, \alpha_2)\} = (S_i, \alpha_1)$; 当 $(S_i, \alpha_1) \leq (S_j, \alpha_2)$ 时, $\min\{(S_i, \alpha_1), (S_j, \alpha_2)\} = (S_j, \alpha_2)$ 。

(2) 二元语义运算

为了便于计算和避免决策信息丢失, 在原有标度 $S = \{S_i\}$ ($i = 0, 1, \dots, T$) 的基础上定义一个拓展标度^[112], $\bar{S} = \{S_i\}$ ($i = 0, 1, \dots, T, \dots, q$), 其中 q 是一个充分大的自然数。若 $i = 0, 1, \dots, T$, 则称 S_i 为本原术语; 若 $i = 0, 1, \dots, T, \dots, q$, 则称 S_i 为拓展术语。在此基础上, 可定义二元语义的一些运算。

定义 3.4 设 $S_i, S_j \in \bar{S}$, 且 (S_i, α_1) 和 (S_j, α_2) 是两个二元语义, 则二元语义的加法、乘法、除法、乘方、开方可分别定义为

$$(S_i, \alpha_1) + (S_j, \alpha_2) = \Delta[\Delta^{-1}(S_i, \alpha_1) + \Delta^{-1}(S_j, \alpha_2)]$$

$$(S_i, \alpha_1) \times (S_j, \alpha_2) = \Delta[\Delta^{-1}(S_i, \alpha_1) \times \Delta^{-1}(S_j, \alpha_2)]$$

$$(S_i, \alpha_1) \div (S_j, \alpha_2) = \Delta[\Delta^{-1}(S_i, \alpha_1) \div \Delta^{-1}(S_j, \alpha_2)]$$

$$(S_i, \alpha_1)^n = \Delta[\Delta^{-1}(S_i, \alpha_1)^n]$$

$$\sqrt[n]{(S_i, \alpha_i)} = \Delta \left[\sqrt[n]{\Delta^{-1}(S_i, \alpha_i)} \right]$$

(3) 二元语义集结算子

在二元语义集结算子研究方面, 可以按照不同的准则集结二元语义信息^[113]。式(3.2)、式(3.3)中的函数 Δ 和 Δ^{-1} 可以毫无信息损失地将数值转换为二元语义形式, 所以一些数值集结算子可以很容易地被推广来处理二元语义信息。目前常用的二元语义集结算子主要有以下几个^[106,107]。

定义 3.5 设 $x = \{(x_1, \alpha_1), (x_2, \alpha_2), \dots, (x_n, \alpha_n)\}$ 是一个二元语义集合, 则基于二元语义的算术平均 (T-AA) 算子 \bar{x} 定义为

$$\bar{x} = \Delta \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \Delta^{-1}(x_i, \alpha_i) \right) = \Delta \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i \right) \quad (3.4)$$

定义 3.6 设 $x = \{(x_1, \alpha_1), (x_2, \alpha_2), \dots, (x_n, \alpha_n)\}$ 是一个二元语义集合, 相应的权重为 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, $\lambda_i \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, 则基于二元语义的加权算术平均 (T-WA) 算子 \tilde{x} 定义为

$$\tilde{x} = \Delta \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta^{-1}(x_i, \alpha_i) \right) = \Delta \left(\lambda_i \sum_{i=1}^n \beta_i \right) \quad (3.5)$$

定义 3.7 设 $x = \{(x_1, \alpha_1), (x_2, \alpha_2), \dots, (x_n, \alpha_n)\}$ 是一个二元语义集合, 位置加权向量为 $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, $p_i \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, 则基于二元语义的有序加权算术平均 (T-OWA) 算子 \hat{x} 定义为

$$\hat{x} = \Delta \left(\sum_{i=1}^n p_i \Delta^{-1}(x_{\sigma(i)}, \alpha_{\sigma(i)}) \right) = \Delta \left(p_i \sum_{i=1}^n \beta_{\sigma(i)} \right) \quad (3.6)$$

式中, $\sigma(i)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 是在二元语义的一个排列中使得 $(x_{\sigma(i)}, \alpha_{\sigma(i)})$ 为第 i 个大的 (x_i, α_i) 。

3.2.3 候选保障中心选址的二元语义群决策

1. 问题描述

由于保障中心选址涉及多因素的影响, 而且这些因素主要来源于过去的经验和专家们的主观判断, 传统的确定性决策模型往往不能很好地反映出各评价信息的不确定性和模糊性。而基于模糊语言评价的方法很好地描述了这些影响因素, 决策专家们可以用“优、较优、良、中、较差、差”等模糊语言形式对备选中心地域的自然条件、

交通条件、安全条件、公共设施条件和政治及经济环境进行评价,进而整合群体意见,全面分析,科学权衡,从而在备选方案集中选择安全可行的选址位置。因此,可以从保障中心选址的实际需求出发,引入模糊群决策理论,将保障中心选址决策问题转化为语言型多指标群决策问题,从而进行分析与求解。基于语言型群决策理论的保障中心选址决策问题可以描述如下。

根据预定保障任务,需要在某区域设置一个装备器材保障中心。现在有 m 个保障中心备选点集合,记为 $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 其中, x_i 表示第 i 个保障中心备选点;保障中心选址评价指标集为 $P=(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)$, 其中 p_1 表示“自然条件”, p_2 表示“交通条件”, p_3 表示“安全条件”, p_4 表示“公共设施条件”, p_5 表示“政治及经济环境”; $\omega=(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)$ 表示各个评价指标相应的权重,且满足 $\sum_{j=1}^5 \omega_j=1, \omega_j \geq 0, j=1, 2, 3, 4, 5$; 设有 n 个装备保障决策专家参与选址决策,记为 $E=(e_1, e_2, \dots, e_n)$, 其中 e_k 表示第 k 个决策专家,假设各个决策专家的权重向量为 $\lambda=(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, λ_k 代表决策专家 e_k 在决策中的权重;决策专家 e_k 给出具有语言评价信息的评价矩阵记为 $B^k=(b_{ij}^k)_{m \times 5}$, 其中 b_{ij}^k 表示决策专家 e_k 从预先定义好的自然语言(或自然语言符号)评价集 S 中选择一个元素作为对备选点 x_i 对应于指标 p_j 的评价值。

自然语言评价集 S 是一个预先定义好的由奇数个元素组成的有序集合。本书中考虑的自然语言评价集 S 是由 7 个元素(语言短语)构成的集合(如表 3.2 所示)。

表 3.2 自然语言评价集 S 元素组成

元素名称	评 价 值	含 义
S_0	FC	非常差
S_1	HC	很差
S_2	C	差
S_3	YB	一般
S_4	H	好
S_5	HH	很好
S_6	FH	非常好

要求依据各个决策专家针对保障中心备选点集合给出的评价意见,采用语言型群决策方法,综合分析,科学计算,从而获得一个综合评价值最高的选址点,以及各个备选点的排序。

2. 评价矩阵的转化

保障中心选址二元语义群决策首先要考虑的问题就是将各个决策专家针对各个备选点情况给出的语言评价矩阵转化成二元语义决策矩阵的形式。

在保障中心选址决策中, \mathbf{B}^k 可以描述如下

$$\mathbf{B}^k = \begin{matrix} & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} b_{11}^k & b_{12}^k & b_{13}^k & b_{14}^k & b_{15}^k \\ b_{21}^k & b_{22}^k & b_{23}^k & b_{24}^k & b_{25}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m1}^k & b_{m2}^k & b_{m3}^k & b_{m4}^k & b_{m5}^k \end{bmatrix} \end{matrix}$$

采用式 (3.1) 中的二元语义转换方法, 将 \mathbf{B}^k 中的每个评价值 B_{ij}^k 转化为二元语义形式, 则得到 \mathbf{B}^k 对应的二元语义决策矩阵如下

$$\mathbf{B}^k = \begin{matrix} & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} (b_{11}^k, 0) & (b_{12}^k, 0) & (b_{13}^k, 0) & (b_{14}^k, 0) & (b_{15}^k, 0) \\ (b_{21}^k, 0) & (b_{22}^k, 0) & (b_{23}^k, 0) & (b_{24}^k, 0) & (b_{25}^k, 0) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (b_{m1}^k, 0) & (b_{m2}^k, 0) & (b_{m3}^k, 0) & (b_{m4}^k, 0) & (b_{m5}^k, 0) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

例如, 假设有 4 个保障中心备选点, 某个决策专家针对这些备选点的评价矩阵为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \text{H} & \text{YB} & \text{C} & \text{HC} & \text{HH} \\ \text{YB} & \text{HH} & \text{FH} & \text{C} & \text{HC} \\ \text{FH} & \text{C} & \text{YB} & \text{HC} & \text{YB} \\ \text{FH} & \text{YB} & \text{H} & \text{C} & \text{YB} \end{bmatrix}$$

则通过式 (3.1) 中的二元语义转换方法, 该评判矩阵的二元语义形式可以表示为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (\text{H}, 0) & (\text{YB}, 0) & (\text{C}, 0) & (\text{HC}, 0) & (\text{HH}, 0) \\ (\text{YB}, 0) & (\text{HH}, 0) & (\text{FH}, 0) & (\text{C}, 0) & (\text{HC}, 0) \\ (\text{FH}, 0) & (\text{C}, 0) & (\text{YB}, 0) & (\text{HC}, 0) & (\text{YB}, 0) \\ (\text{FH}, 0) & (\text{YB}, 0) & (\text{H}, 0) & (\text{C}, 0) & (\text{YB}, 0) \end{bmatrix}$$

3. 指标权重的确定

在保障中心选址决策过程中, 自然条件、交通条件、安全条件、公共设施条件和政治及经济环境等评价指标的权重确定是一个复杂问题, 由于这些指标具有复杂性及人类思维的模糊性, 决策专家往往难以给出明确的指标权重, 甚至会出现各个评价指标权重完全未知的极端情况。对于假设保障中心选址各个指标权重已知的情况, 可以直接应用二元语义相关算子, 进行群决策及求解, 获得权重值。本书重点对权重信息未知情况下的选址决策问题进行研究, 并采用偏差最大化的思想, 探讨一种在各指标权重未知情况下的权重求解方法。

(1) 权重评价信息已知的情況

假设决策专家 e_k 针对保障中心选址评价指标集 P 给出具有语言评价信息的权重值为 $R^k = (r_1^k, r_2^k, r_3^k, r_4^k, r_5^k)$, 其中 r_j^k 表示决策专家 d_k 从预先定义好的自然语言 (或自然语言符号) 评价集 L (如表 3.3 所示) 中选择一个元素作为对指标 p_j 的重要度的描述。

表 3.3 自然语言评价集 L 元素组成

元素名称	评 价 值	含 义
L_0	FBZ	非常不重要
L_1	HBZ	很不重要
L_2	BZ	不重要
L_3	YB	一般
L_4	Z	重要
L_5	HZ	很重要
L_6	FZ	非常重要

首先, 采用式 (3.1) 中的二元语义转换方法, 将 R^k 中的每个指标权重评价值 r_j^k 转化为二元语义形式, 则得到 R^k 对应的二元语义形式如下

$$R^k = ((r_1^k, 0), (r_2^k, 0), (r_3^k, 0), (r_4^k, 0), (r_5^k, 0))$$

假设在所有决策专家中, 各个决策专家相应的权重相同。首先, 采用二元语义加权算术平均算子 T-WA [式 (3.5)] 对各个专家指标权重评价信息进行集结, 从而获得所有专家群体指标权重评价值 $R = ((r_1, \alpha_1), (r_2, \alpha_2), (r_3, \alpha_3), (r_4, \alpha_4), (r_5, \alpha_5))$, 最后, 通过计算可获得保障中心选址各个指标的权重值 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)$ 。

(2) 权重评价信息未知的情况

保障中心选址决策问题的解决, 其实质是对各个备选点的综合评价值的排序比较。若所有备选点在指标 p_j 下的评价值差异越小, 则说明该指标对保障中心选址决策与排序所起的作用越小; 反之, 若指标 p_j 使所有备选点的评价值有较大差异, 则说明其对选址决策与排序起重要作用。因此, 从对保障中心备选点进行排序的角度考虑, 对于保障中心备选点评价值的偏差越大的指标 (无论其本身的重要性程度如何), 应该赋予越大的权重; 特别地, 若所有保障中心备选点在指标 p_j 下的评价值无差异, 则指标 p_j 对备选点的排序将不起作用, 可令其权重为零。这就是偏差最大化方法的主要思路^[113,114]。因此, 在保障中心选址各个指标权重评价信息未知的情况下, 本书拟采用基于偏差最大化的求解思想对各个保障中心选址决策专家给出的二元语义决策矩阵进行分析和处理, 从而获得各个选址指标的相应权重。

首先, 给出两个二元语义信息之间的距离定义。

定义 3.8 设 (S_i, α_1) 和 (S_j, α_2) 为任意两个二元语义信息, 则它们之间的距离为

$$d[(S_i, \alpha_1), (S_j, \alpha_2)] = \Delta \left[\left| \Delta^{-1}(S_i, \alpha_1) - \Delta^{-1}(S_j, \alpha_2) \right| \right] \quad (3.7)$$

在二元语义决策矩阵 $\mathbf{B}^k = (b_{ij}^k, 0)_{m \times 5}$ 中, 对于评价指标 p_j , 若备选点与其他所有备选点的偏差用 $D_{ij}^k(\omega)$ 表示, 可以表示为

$$D_{ij}^k(\omega) = \Delta \left\{ \sum_{q=1}^m \Delta^{-1} d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)] \omega_j \right\} \quad (3.8)$$

式中, $q = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, 3, 4, 5$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

令

$$D_j^k(\omega) = \Delta \left(\sum_{i=1}^m \Delta^{-1} D_{ij}^k(\omega) \right) = \Delta \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^m \Delta^{-1} d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)] \omega_j \right\} \quad (3.9)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, m$, $q = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, 3, 4, 5$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

对于指标 p_j 而言, $D_j^k(\omega)$ 表示第 k 个选址决策专家评价的所有选址方案与其他选址方案的总偏差, 则指标权重向量 ω 的选择应使所有决策专家的所有指标对所有选址方案的总偏差之和最大。为此, 构造偏差函数

$$\max D(\omega) = \Delta \left(\sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{j=1}^5 \Delta^{-1} D_j^k(\omega) \right)$$

即

$$\max D(\omega) = \Delta \left\{ \sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^m \Delta^{-1} d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)] \omega_j \right\}$$

因而, 求解指标权重向量 ω 等价于求解如下单目标最优化问题

$$\begin{cases} \max D(\omega) = \Delta \left\{ \sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^m \Delta^{-1} d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)] \omega_j \right\} \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^5 \omega_j^2 = 1, \omega_j \geq 0, j = 1, 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (3.10)$$

为方便求解上述模型, 可构造如下优化模型

$$\begin{cases} \max \Delta^{-1} D(\omega) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^m \Delta^{-1} d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)] \omega_j \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^5 \omega_j^2 = 1, \omega_j \geq 0, j = 1, 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (3.11)$$

解此模型，作拉格朗日（Lagrange）函数，即

$$\Delta^{-1}D(\omega, \lambda) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^m \Delta^{-1}d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)] \omega_j + \lambda \left(\sum_{j=1}^5 \omega_j^2 - 1 \right) \quad (3.12)$$

求其偏导数，并令

$$\frac{\partial \Delta^{-1}D(\omega, \lambda)}{\partial \omega_j} = \sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^m \Delta^{-1}d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)] \omega_j + 2\lambda \omega_j = 0$$

且

$$\frac{\partial \Delta^{-1}D(\omega, \lambda)}{\partial \lambda} = \sum_{j=1}^5 \omega_j^2 - 1 = 0$$

得到求解各个选址评价指标权重的公式为

$$\omega_j = \frac{\sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^m \Delta^{-1}d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)]}{\sqrt{\sum_{j=1}^5 \left[\sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^m \Delta^{-1}d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)] \right]^2}} \quad (3.13)$$

然后对权重向量做归一化处理，得到

$$\omega_j = \frac{\sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^m \Delta^{-1}d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)]}{\sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^n \lambda_k \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^m \Delta^{-1}d[(b_{ij}^k, 0), (b_{qj}^k, 0)]} \quad (3.14)$$

通过计算，就可以获得保障中心选址各个评价指标的群体综合权重值。

4. 基于二元语义候选保障中心选址群决策流程

结合保障中心选址要求，运用二元语义群决策方法，设计保障中心选址二元语义群决策流程（如图 3.5 所示）。

（1）针对装备保障决策专家们给出的语言决策矩阵 $\mathbf{B}^k = (b_{ij}^k)_{m \times 5}$ ，利用式（3.1）中的二元语义转换方法，将其转化为二元语义决策矩阵 $\mathbf{B}^k = (b_{ij}^k, 0)_{m \times 5}$ ，若权重评价信息已知，即已给出各个指标的权重评价值 $R^k = (r_1^k, r_2^k, r_3^k, r_4^k, r_5^k)$ ，则同样将其转化为二元语义形式 $R^k = ((r_1^k, 0), (r_2^k, 0), (r_3^k, 0), (r_4^k, 0), (r_5^k, 0))$ 。

（2）若各指标权重评价信息已知，则采用二元语义加权算术平均 T-WA 算子 [式（3.5）] 对各个专家指标权重评价信息 $R^k = ((r_1^k, 0), (r_2^k, 0), (r_3^k, 0), (r_4^k, 0), (r_5^k, 0))$ 进行集

结, 从而获得专家群体指标权重评价值 $R = ((r_1, \alpha_1), (r_2, \alpha_2), (r_3, \alpha_3), (r_4, \alpha_4), (r_5, \alpha_5))$, 并通过式 (3.13) 获得保障中心选址各个指标的权重值 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)$ 。

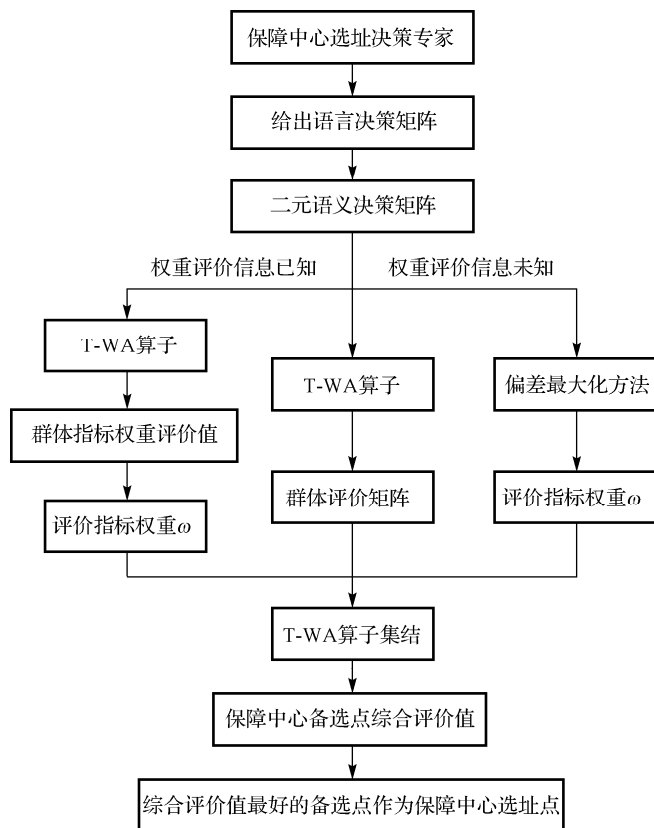


图 3.5 保障中心选址二元语义群决策流程

(3) 若各指标权重评价信息未知, 则采用二元语义加权算术平均 T-WA 算子 [式 (3.5)] 对各个决策专家给出的二元语义决策矩阵 $\mathbf{B}^k = (b_{ij}^k, 0)_{m \times 5}$ 进行集结, 从而获得群体的二元语义决策矩阵 $\mathbf{B} = (\tilde{b}_{ij}, \alpha_{ij})_{m \times 5}$, 并采用偏差最大化方法, 通过式 (3.14), 获得保障中心选址各个指标的权重值 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)$ 。

(4) 获得各个指标的权重值后, 可采用二元语义加权算术平均 T-WA 算子对每个备选点的各个指标群体评价价值进行集结, 即

$$X_i(\omega) = (x_i, \alpha_i) = \Delta \left(\sum_{i=1}^5 \omega_i \Delta^{-1}(\tilde{b}_{ij}, \alpha_{ij}) \right) \quad (3.15)$$

从而获得各个备选点的综合评价价值。最后, 就可以选择综合评价价值最好的备选点作为保障中心选址点。

3.3 基于双层混合整数规划的保障中心选址决策

3.3.1 模型建立

1. 问题描述

本书所研究的双层混合整数规划模型综合考虑了 p 中值中位问题和 r 中断中值问题。 p 中值中位问题研究的是如何从候选网络节点中开设 p 个服务设施,使得服务设施和需求点间的总服务代价(服务成本)最小; r 中断中值问题是 p 中值中位问题的对立问题,研究的是在 p 个已有的设施中,如何选择其中的 r 个设施实施中断(破坏),使得这 r 个设施被中断后网络系统的运行成本最大。本书所研究的双层混合整数规划选址问题综合考虑了这两个问题,将 p 中值中位问题作为上层选址模型,将 r 中断中值问题作为下层攻击模型。基于双层混合整数规划的装备器材保障中心选址决策问题可以描述为:在含有 n 个需求点和 m 个候选保障中心的网络中,已知每个需求点的需求量及每个需求点与每个候选保障中心之间的权重距离,围绕网络运行成本最小化与最大化,攻击方和防御方展开攻防博弈。将 P 中值中位问题视为上层防御者,其目的是从 m 个候选保障中心中选择 p 个作为保障中心开设基点,使得网络的权重距离和最小,将 r 中断中值问题视为下层攻击者,其目的是从上层防御者的决策结果中选择 r 个未被防御的保障中心作为攻击(破坏)目标,使得这些目标被攻击后网络系统的运行成本最大。我们的目的是寻找最坏情况下的选址策略,即当下层攻击者目标函数值最优时防御方的选址策略。

为了便于进一步研究,对所研究的问题做如下假设。

(1) 攻击资源与防御资源均有限,在资源约束下,攻击方不能对所有保障中心实施攻击,防御方也不能对所有保障中心实施防御,同时假设攻击资源数量要小于防御资源数量,即 $r < p < m$ 。

(2) 保障中心一旦被防御,就认为该保障中心受到完全防护;同理,保障中心一旦被攻击,就认为该保障中心遭到完全攻击,其器材供应能力完全丧失。

(3) 攻击方和防御方都是理智的,攻击与防御信息是透明的。这意味着双方具有同等的战场态势掌握能力,攻击方不会去攻击受到防御的保障中心,防御方也不会浪费防御资源对遭到攻击的保障中心施加防御。

2. 目标函数分析

模型中, 攻防双方都以网络运行成本最小化或最大化为目标, 双方围绕网络运行成本展开攻防博弈。因此, 要明确攻防双方具体的目标函数, 首先应对网络的运行成本构成进行分析。

将网络运行成本分为攻击前运行成本(或常规运作成本)和攻击后运行成本, 分别用 BI 和 AI 表示。其中, BI 包括以下三部分。

(1) BI_1: 建立 p 个保障中心的固定成本。每个保障中心建设的固定成本不同。

(2) BI_2: 建立 p 个保障中心的边际成本。在经济学中, 边际成本代表每个新增产品带来的总成本的增量。一般来说, 当产品实现批量生产时, 边际成本会很小, 也就是说, 生产一万支钢笔时每支钢笔的成本与只生产一支钢笔时的成本是不一样的。这里的边际成本指的是保障中心因所服务的需求点数量的不同而导致的成本差异。

(3) BI_3: 需求点与其最近的保障中心之间的需求权重距离成本。可以从不同角度理解需求权重距离成本, 如运输费用、运输时间等。

上层防御者进行选址决策, 下层攻击者进行攻击决策, 选择不超过 r 个保障中心实施攻击。当一个保障中心遭到攻击时, 由于该保障中心丧失了服务提供能力, 相应的需求点将被重新分配到其他保障中心, 从而致使部分保障中心的服务负载增大, 为了应对服务负载的增大, 保障中心按一定的单位比例扩容, 从而产生容量扩张代价。由于空间限制、缺少人力或设备等原因, 某些保障中心的容量扩张代价可能会增大到无穷大, 此时, 认为该保障中心的容量超出其允许的负载限制。基于以上分析, 将攻击后运行成本 AI 分成以下三部分。

(1) AI_1: 由于需求重新分配, 未被攻击的保障中心收到新的需求, 导致容量扩充, 相应的容量扩充成本用 AI_1 表示。

(2) AI_2: 保障中心被攻击后, 相应的需求重新分配给未被攻击的保障中心, 相比攻击之间与原保障中心的需求权重距离, 需求点与新的保障中心之间的需求权重距离增大, 从而导致产生额外的运行成本, 这部分成本用 AI_2 表示。

(3) AI_3: 对于未遭受攻击的保障中心, 它们与各自需求点之间的需求权重距离成本用 AI_3 表示, 很明显, AI_3 包含 AI_2。

攻击前运行成本 BI 代表保障中心建立的固定成本和攻击前正常运行成本, 应当纳入防御者的目标函数中, 另外, 攻击后的成本 AI_1 和 AI_2 也属于防御者成本优化的范畴, 因此, 上层防御者的目标是最小化以下 5 项成本之和

$$f_1 = \min\{BI_1 + BI_2 + BI_3 + AI_1 + AI_2\}$$

显然, 下层攻击者的目标则是最大化 AI_1 和 AI_3 的和, 即

$$f_2 = \max \{AI_1 + AI_3\}$$

这里将 AI_2 (而不是 AI_3) 加入防御者的目标函数中, 其原因是为了避免重复计算成本, 因为在保障中心遭受攻击后, 有一部分需求点不会受到影响, 它们不会参与重新分配, 因此也就不会产生成本变动。

3. 模型建立

对相关变量及其含义说明如下。

$I = \{1, \dots, n\}$, 需求点集合。

$J = \{1, \dots, m\}$, 候选保障中心集合, 来源于第一阶段的候选保障中心选址结果。

d_{ij} : 需求点 i 和保障中心 j 之间的权重距离成本。

q_i : 需求点 i 的需求量。

f_j : 建立保障中心 j 所需要的固定成本。

c_j : 保障中心 j 的边际成本。

b_j : 保障中心 j 的防御成本。

b_{tot} : 防御者的防御资源预算。

r : 防御者最多可以中断的保障中心的数量。

决策变量如下。

X_j : 若在 j 处建立保障中心, 则值为 1, 否则为 0。

Y_j : 若保障中心 j 被防御, 则值为 1, 否则为 0。

S_j : 若保障中心 j 由于中断而丧失服务能力, 则值为 1, 否则为 0。

U_{ij} : 中断前, 需求点 i 被分配给保障中心 j , 则值为 1, 否则值为 0。

V_{ij} : 中断后, 需求点 i 被分配给保障中心 j , 则值为 1, 否则值为 0。

另外, 引入辅助变量 F_{ij} 表示候选保障中心的子集, 这部分候选保障中心离需求点 i 的距离不大于保障中心 j 离需求点 i 的距离, $F_{ij} = \{k \in J \mid d_{ik} \leq d_{ij}\}$ 。

在问题描述及目标函数分析的基础上, 建立装备器材保障中心的双层混合整数规划选址模型, 模型分为上层决策模型和下层决策模型, 上层决策的目的是使网络运行成本最小, 下层决策则通过破坏上层决策结果, 使网络运行成本最大。

上层决策模型

$$\min_{U, X, V} Z_{\text{def}} = \sum_{i \in I} f_j X_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (c_j + d_{ij}) q_i U_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (c_j + d_{ij}) q_i (1 - U_{ij}) V_{ij} \quad (3.16)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} X_j = p \quad (3.17)$$

$$\sum_{j \in J} U_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (3.18)$$

$$\sum_{i \in I} U_{ij} \leq nX_j, \forall j \in J \quad (3.19)$$

$$\sum_{k \in F_{ij}} U_{ik} \geq X_j, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.20)$$

$$Y_j \leq X_j, \forall j \in J \quad (3.21)$$

$$\sum_{j \in J} b_j Y_j \leq b_{\text{tot}} \quad (3.22)$$

$$U_{ij}, X_j, Y_j \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.23)$$

下层决策模型

$$\max_{S, V} Z_{\text{att}} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_j q_j (1 - U_{ij}) V_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_i d_{ij} V_{ij} \quad (3.24)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} V_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (3.25)$$

$$\sum_{j \in J} S_j \leq r \quad (3.26)$$

$$S_j \leq X_j - Y_j, \forall j \in J \quad (3.27)$$

$$\sum_{i \in I} V_{ij} \leq nX_j (1 - S_j), \forall j \in J \quad (3.28)$$

$$\sum_{k \notin F_{ij}} V_{ik} \leq 1 + S_j - X_j, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.29)$$

$$V_{ij} \geq U_{ij} (1 - S_j), \forall j \in J \quad (3.30)$$

$$V_{ij}, S_j \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.31)$$

4. 模型分析

在上述模型中，式（3.16）～式（3.23）是上层选址和防御决策模型，式（3.24）～式（3.31）是下层中断决策模型。

式(3.16)是防御者的目标函数,函数由三部分组成,第一部分是建立 p 个保障中心的固定费用(BI_1),若每个保障中心的建立费用相同,则在建设保障中心数量一定的前提下,该部分为常数,可以从模型中去除。第二部分等于 BI_2+BI_3 ,即保障中心容量的边际成本和保障中心与需求点之间的旅行成本之和。第三部分等于 AI_1+AI_2 ,即需求点重新分配导致保障中心扩容产生的容量扩张成本和需求权重距离增大导致的成本之和,第三部分加上 $(1-U_{ij})V_{ij}$ 的原因是为了保证只有受中断影响的保障中心和需求点纳入目标函数的计算中。

式(3.17)表示共选择 p 个保障中心。式(3.18)表示中断前每个需求点有且只有一个保障中心为其提供服务,这是为了确保选址结果满足标准的建制保障关系,即保障网络中任何一个节点至多有一个父节点。式(3.19)防止需求点被分配到非保障中心节点上。式(3.20)表示网络中的需求点均按照就近原则寻找为其服务的保障中心节点,并且网络中的每个需求点均可以得到服务。式(3.20)的约束过程可以描述为:对于任意一对节点 (i,j) ,如果在节点 j 处不建立保障中心,即 $X_j=0$,那么式(3.20)不影响原问题的求解,如果在节点 j 处建立保障中心,即 $X_j=1$,那么需求点 i 将会到节点 j 或距离不会比节点 j 远的节点去寻求服务分配,当存在多个与 j 距离一样的保障中心时,由于式(3.19)的存在,式(3.20)同样成立。式(3.21)表示如果节点 j 不是保障中心节点,那么防御者不会对它实施防御。式(3.22)对防御者的防御资源进行了限制。式(3.23)是决策变量的0-1约束。

通过求解上层决策模型,可以获得决策变量 U_{ij} 、 X_j 、 Y_j 的值,将其作为下层决策模型的输入参数。式(3.24)表示下层决策者(攻击方)的目标函数,其值为 AI_1+AI_3 ,即中断后的容量扩张成本与需求权重距离成本之和。式(3.25)表示中断后每个需求点有且只有一个保障中心节点为其提供服务。式(3.26)表示攻击者至多中断 r 个保障中心。式(3.27)是逻辑约束,表示只有是保障中心且未被防护时才会被中断,同时该不等式也连接了上、下两层约束规划模型,由于式(3.21)的存在,式(3.27)右侧的值必然为非负值,因此,中断决策变量的值为非负,这在模型求解时有利于提高求解效率。式(3.28)也是一个逻辑约束,防止需求点被分配给已经被中断的保障中心或非保障中心节点,对于给定的 X_j (上层决策模型已经求解出 X_j 的值),式(3.28)右侧的表达式已经是线性的,因此在求解下层决策模型时,没有必要因为要转化成线性问题求解而将 $X_j(1-S_j)$ 线性化。式(3.29)确保需求点在重新分配时能够被分配到离其最近的保障中心,式(3.29)的约束过程可以描述为:首先,对于给定的需求点 i 和保障中心节点 j ,式(3.29)左侧的求和部分为所有离 i 比 j 远的保障中心节点,如

果保障中心节点 j 被中断 ($S_j = X_j$), 那么式 (3.29) 变为 $\sum_{k \notin F_{ij}} V_{ik} \leq 1$, 由于每个需求点最后都会被分配到某个保障中心, 因此, $\sum_{k \notin F_{ij}} V_{ik} \leq 1$ 恒成立; 如果节点 j 不是保障中心节点 ($X_j = S_j = 0$), 则式 (3.29) 同样变为 $\sum_{k \notin F_{ij}} V_{ik} \leq 1$; 如果节点 j 是保障中心节点且没有被攻击 ($X_j = 1, S_j = 0$), 则式 (3.29) 变为 $\sum_{k \notin F_{ij}} V_{ik} \leq 1$, 不会成立, 也就是说需求点 i 不会被重新分配到比离节点 j 远的保障中心节点。当存在多个保障中心到 i 的距离一样时, 由于逻辑式 (3.28) 的存在, 式 (3.29) 仍然成立, 因此式 (3.28) 不能在约束条件中被忽略。 U_{ij} 是上层决策模型的输出值, 在下层模型中作为参数输入, 相对于下层模型来说就是常量, 因此, 与式 (3.28) 类似, 式 (3.30) 可以视为线性约束。式 (3.30) 表示在上层模型中, 需求点 i 被分配给保障中心 j ($U_{ij} = 1$), 那么在下层模型中, 除非保障中心 j 被中断, 在重新分配需求时, 需求点 i 仍然保持被分配给保障中心 j 的状态不变 ($V_{ij} = 1$)。在重新分配需求时, 当有多个保障中心离 i 的距离与 j 离 i 的距离一样时, 该约束严格限制了需求点 i 寻求保障中心 j 的方式, 有利于提高模型的求解效率, 换句话说, 如果没有该约束, 那么需求点 i 会被重新分配, 分配的结果是新的保障节点离 i 的距离与先前 j 离 i 的距离一样, 但是却导致了多余的计算, 降低了求解的效率。最后, 式 (3.31) 是下层决策变量的 0-1 约束。

3.3.2 模型求解算法设计

1. 算法的总体思路

到目前为止, 求解双层规划问题主要有以下几类算法^[115]。

(1) 极点搜索法^[116~120]。这类算法主要针对线性双层规划问题, 其基本思想是: 线性双层规划问题的全局最优解一定会出现在问题对应的约束域的极点上, 也就是说, 在约束域空间的极点上能搜索到问题的全局最优解。该性质是 Candler 和 Townsley 在讨论不含上层约束的线性双层规划问题时发现, 随后 Bard 和 Bialas 在约束域有界的假设下证明了该结论。基于这个性质, 提出了极点搜索算法, 具有代表性的有 Candler 和 Townsley 提出的传统极点枚举算法与 Bialas 和 Karwan 提出的“ k 次最好”算法, 邓键对传统极点枚举算法和“ k 次最好”算法进行了改进, 并以此为基础研究了包括多跟随者、线性分数型在内的多种双层规划问题。

(2) 分支定界法^[121~123]。分支定界法是一种求解整数规划问题的最常用算法, 这种方法的基本原理是将双层规划的下层问题用它的 K-T 条件代替, 构造与原双层规划

等价的 K-T 模型,然后用分支定界技术处理 K-T 模型中的互补项,求解一个易于求解的标准数学规划问题。此类方法主要用于求解线性和凸双层规划问题。由于存在互补松弛项,转化后的问题一般是非凸的,处理松弛项的不同的方法形成了不同的分支定界法。

(3) 罚函数算法^[124~128]。该方法主要应用非线性规划理论中的罚函数原理,利用不同形式的惩罚项,把下层问题转化为一个无约束数学规划问题,然后把惩罚项加到上层目标函数中,将问题转化为一个带惩罚参数的单层问题,再通过求解一系列非线性规划问题来获得问题的全局最优解。

(4) 下降方法^[129~131]。这类方法主要利用非线性规划中常用的最速下降方向法和基于旋转尺度的方法,针对不同类型的双层规划问题,提出求解问题的局部最优策略或全局最优策略。

(5) 互补旋转算法^[132~134]。其主要思想是将问题转化为一个带参数的互补问题,然后用受限基算法,也就是带参数的互补主元算法进行求解。

(6) 非数值优化算法^[135~138]。主要包括遗传算法和模拟退火算法等,目前这种非数值优化方法主要用于工程问题,但收敛性一般难以保证。

从目前的文献来看,求解线性双层规划问题的算法要好于求解非线性双层规划问题的算法,这是因为线性问题比非线性问题更加容易求解。自 20 世纪 90 年代开始,国内也有学者开始研究和应用双层规划模型与优化技术,但主要集中在应用方面,对双层规划理论和求解方法的研究还较少,并且与国外学者的成果存在不小的差距。

一般来说,求解双层规划问题是非常困难的,主要原因体现在两方面。第一,双层规划问题是一个 NP-Hard 问题,Jeromlow R G^[139]第一个证明了线性双层规划问题是 NP-Hard 问题。第二,双层规划问题具有非凸性,即便双层规划问题的形式简单到上下层都只包含连续型变量,一般来说它也只是个非凸优化问题,求解非常困难,即便能找到最优解,通常也只能是个局部最优解,而非全局最优解。为了求解双层混合整数规划模型,设计一种两阶段算法对其求解。通过分析不难发现,装备器材保障中心选址问题包含“选址—防御—攻击”三个子问题,在算法的第一阶段,运用禁忌搜索算法从 m 个候选保障中心节点中选择 p 个最佳的节点,完成选址决策,从而将原问题变为只有“防御—攻击”两个子问题的决策问题,即防御者确定 p 个候选保障中心节点中哪 q 个需要实施防御,攻击者从未被防御的保障中心节点中确定哪 r 个节点需要实施中断。对于该子问题,在算法的第二阶段运用隐枚举算法对其求解。

用伪代码表示算法的总体思路如下。

用禁忌搜索算法求解选址问题,从群决策的 m 个初选结果中确定 p 个候选保障中心

对于每个选址结果 J_p ，将 J_p 作为下层问题的输入，运用隐枚举算法求解防御方和攻击方的最优目标函数值，记录求解结果，比较各求解结果，选择最优解作为问题的最终输出结果。

保障中心选址算法的总体思路如图 3.6 所示。

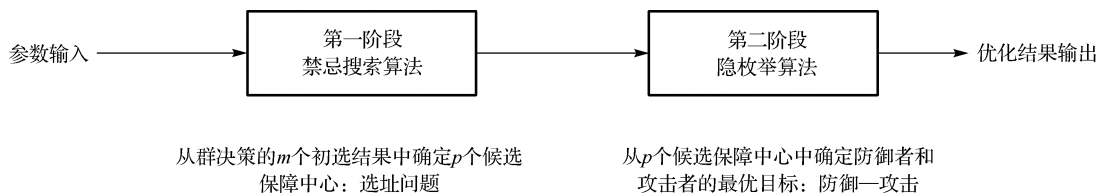


图 3.6 保障中心选址算法的总体思路

2. 禁忌搜索算法设计

禁忌搜索算法是著名的全局搜索算法，能够有效引导最优解从局部最优向全局最优转化。1997 年 Glover 和 Laguna 对禁忌搜索算法进行了深入探讨，之后该算法迅速在组合优化求解领域得到广泛应用，禁忌搜索算法成功地在 p 中值问题及其扩展问题中得到应用^[140]。

禁忌搜索算法的核心元素包括初始可行解的确定、领域结构、禁忌条件、特赦条件和终止条件，本书中的禁忌搜索算法相关说明如下。

(1) 初始可行解。确定该初始可行解的思路是：如果选择某 p 个节点作为上层问题的最优解，那么开设这 p 个保障中心节点的固定成本加上所有需求点到各节点的旅行成本之和最小。具体做法是：从 m 个候选保障中心节点中选择 p 个节点作为保障中心节点，则共有 C_m^p 种选法，循环每种选法所对应的集合，对于其中的保障中心节点 j ，计算所有需求点到 j 的需求权重距离并记录累加值，对于特定的节点 j ，建立该节点的固定成本 f_j 是一定的，将前面的累加值和固定成本 f_j 求和，记为 b_j 。最后，根据 b_j 的大小对集合中的保障中心集合按降序排序，取 b_j 最小的保障中心集合作为初始可行解。

(2) 领域结构。通过三次交换来产生当前解的领域结构。在第 k 次交换时，从当前解空间中选择 k 个保障中心节点，将这 k 个节点与 $p-k$ 个非保障中心节点进行交换，由于是等量交换，始终保持解的个数是 p ，因此可以防止维数不是 p 的解向量（这部分解是非可行解）进入解空间，减少算法搜索空间。每次交换都产生相等数量的领域解，使得防御者目标函数最小的邻居将作为下一次交换中的当前解。

(3) 禁忌条件。通过禁忌搜索迭代更新当前解，禁忌条件则用于防止搜索算法再次搜索已被搜索过的解空间。

(4) 特赦条件。当禁忌表中的某个对象能够提供比当前最优解更好的目标函数值时, 该对象即被特赦。

(5) 终止条件。这里使用两条终止条件: 第一条是循环迭代次数达到最大值, 第二条是在循环迭代过程中目标函数值连续达到一定的次数均没有改变。只要以上任何一个条件满足, 禁忌搜索就终止。

3. 隐枚举算法设计

隐枚举算法是运筹学中的经典算法, 运用该算法可求解“防御—攻击”子问题。令 $J_p = \{J_1, \dots, J_p\}$ 代表禁忌搜索迭代过程中当前解的一个邻居, 若选址决策变量 X 已知, 则可以通过式 (3.19) 和式 (3.20) 快速对攻击前的需求点分配做出决策, 假设用 U_{ij}^* 表示需求点分配方案, 将 U_{ij}^* 作为第二阶段隐枚举算法的参数输入。运用禁忌搜索算法完成第一阶段的选址决策后, 第二阶段中的原问题就退化成“防御—攻击”子问题。此时, 原模型变为如下模型。

上层模型:

$$\min_Y Z_{\text{def}}(J_p) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_p} (c_j + d_{ij}) q_i (1 - U_{ij}^*) V_{ij} \quad (3.32)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J_p} b_j Y_j \leq b_{\text{tot}} \quad (3.33)$$

$$Y_j \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J_p \quad (3.34)$$

下层模型:

$$\max_{S, V} Z_{\text{att}}(J_p) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_p} c_j q_i (1 - U_{ij}^*) V_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_p} q_i d_{ij} V_{ij} \quad (3.35)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J_p} V_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (3.36)$$

$$\sum_{j \in J_p} S_j \leq r \quad (3.37)$$

$$S_j \leq X_j - Y_j, \forall j \in J_p \quad (3.38)$$

$$\sum_{i \in I} V_{ij} \leq n(1 - S_j), \forall j \in J_p \quad (3.39)$$

$$\sum_{k \in F_{ij}} V_{ik} \leq S_j, \forall i \in I, \forall j \in J_p \quad (3.40)$$

$$V_{ij} \geq U_{ij}^*(1 - S_j), \forall j \in J_p \quad (3.41)$$

$$S_j, V_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J_p \quad (3.42)$$

Maria 等人^[141]设计了一种隐枚举算法用于求解此类模型,其基本思想是构造一个二叉树,然后遍历二叉树寻找模型的最优值。本书将采用 Maria 等人使用的二叉树隐枚举算法来求解“防御—攻击”子问题,隐枚举算法用于计算第一阶段禁忌搜索迭代过程中当前解每个邻居 J_p 所对应的最优防御目标函数值和最优攻击目标函数值。

利用隐枚举算法的核心思想可以归纳为:在不考虑防御时的下层规划问题中,假设 R 是攻击方最优攻击策略下含有 r 个元素的攻击目标集合,那么防御方最优防护策略下含有 q 个元素的防御目标集合至少应该包含 R 中的一个元素。应用该算法生成二叉树的具体步骤如下。

第一步,不考虑防御寻找下层问题的最优解,即在攻击资源约束下,寻找 r 个节点实施中断,使得式 (3.35) 的值最大。

第二步,将第一步的优化计算结果作为防御者的防御候选节点集合,防御者随机从集合中挑选一个节点 j ,对是否对节点 j 实施防御进行决策。

第三步,如果防御者决定对节点 j 进行防御,那么重新计算下层问题(注意,此时节点 j 不能被中断),然后跳转到第二步。如果防御者决定对节点 j 不进行防御,那么防御者需要对除 j 之外的候选节点集合中的节点是否实施防御进行决策,此处要分两种情况:(1)若将节点 j 从候选节点集合中移除后,候选节点集合已经为空,则终止;(2)否则,从剩下的节点中任意选择一个,并重新执行第三步,进行新一轮的决策。

第四步,按照上面的步骤一直循环,直到所有节点都为叶子节点。

第五步,比较所有叶子节点的中断值,其中中断值最大的项为下层攻击问题的最优策略。

图 3.7 所示为 $p=6$ 、 $q=2$ 、 $r=2$ 时隐枚举算法的执行过程。其中, I 表示中断集合, Z_i 表示对第 i 个节点实施防御。根节点 T_0 表示在没有防御的情况下,对下层中断问题进行求解,求解结果是攻击 1 号节点和 2 号节点可以使得式 (3.35) 的目标函数值最大 (T_0)。接下来考虑上层防御者的行为:若防御者对 1 号节点进行防御 ($Z_1=1$),则重新求解下层防御问题(注意,此时 1 号节点不能被攻击),求解结果为攻击 3 号节点和 6 号节点可以使得下层目标函数值最大 (T_1);若防御者对 2 号节点进行防御 ($Z_2=1$),则重新求解下层防御问题(注意,此时 2 号节点不能被攻击),求解结果

为攻击1号节点和3号节点可以使得下层目标函数值最大 (T_2)。按照此方法不断循环,直到所有节点都是叶子节点为止。对于每个叶子节点 (T_3, T_4, T_5, T_6),下层问题都有一个目标函数值,它们构成集合 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$,取集中中值最大的项所对应的中断 I 作为最终的中断目标集合,从该节点往根节点逆向追溯,可以找到最终的防御目标集合 Z 。图 3.7 中,最终求解结果为:中断集合 $I = \{1, 6\}$,防御集合 $Z = \{2, 3\}$ 。

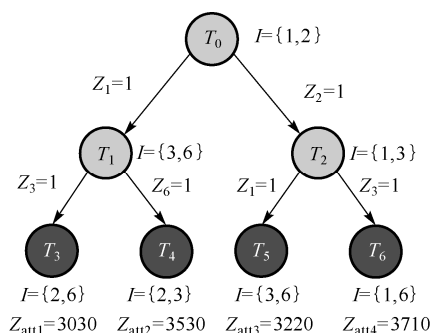


图 3.7 $p=6$ 、 $q=2$ 、 $r=2$ 时隐枚举算法的执行过程

4. 算法执行流程

前面分析了禁忌搜索算法和隐枚举算法两种关键算法,在此基础上,给出算法的具体执行流程,如图 3.8 所示。

算法执行流程图中的相关符号说明如下。

num_iter: 当前的迭代累计次数。

Max_Iter: 设置的最大迭代次数,当 **num_iter** 达到 **Max_Iter** 时,认为在可接受的时间内无法求得最优解,算法终止。

num_nonimp_iter: 当前解没有改善的连续迭代累计次数。

Max_Noimp_Iter: 设置的解没有改善的连续迭代累计次数最大值,当 **num_nonimp_iter** 达到 **Max_Noimp_Iter** 时,认为解趋于稳定,算法终止。

num_neigh: 当前迭代循环中产生的邻居数量。

size_neigh_k: 当前迭代循环中,第 i 次移动的邻居数量, $k=1,2,3$ 。

Obj: 新产生的邻居的目标函数值 Z_{def} 。

Obj_Best_Neigh: 当前邻域所有邻居中的最优目标函数值 Z_{def} 。

Obj*: 防御者当前最优目标函数值。

tabu_duration(k): 当前解的禁忌长度。

Max_Tabu_Dur: 禁忌长度的最大可能值。

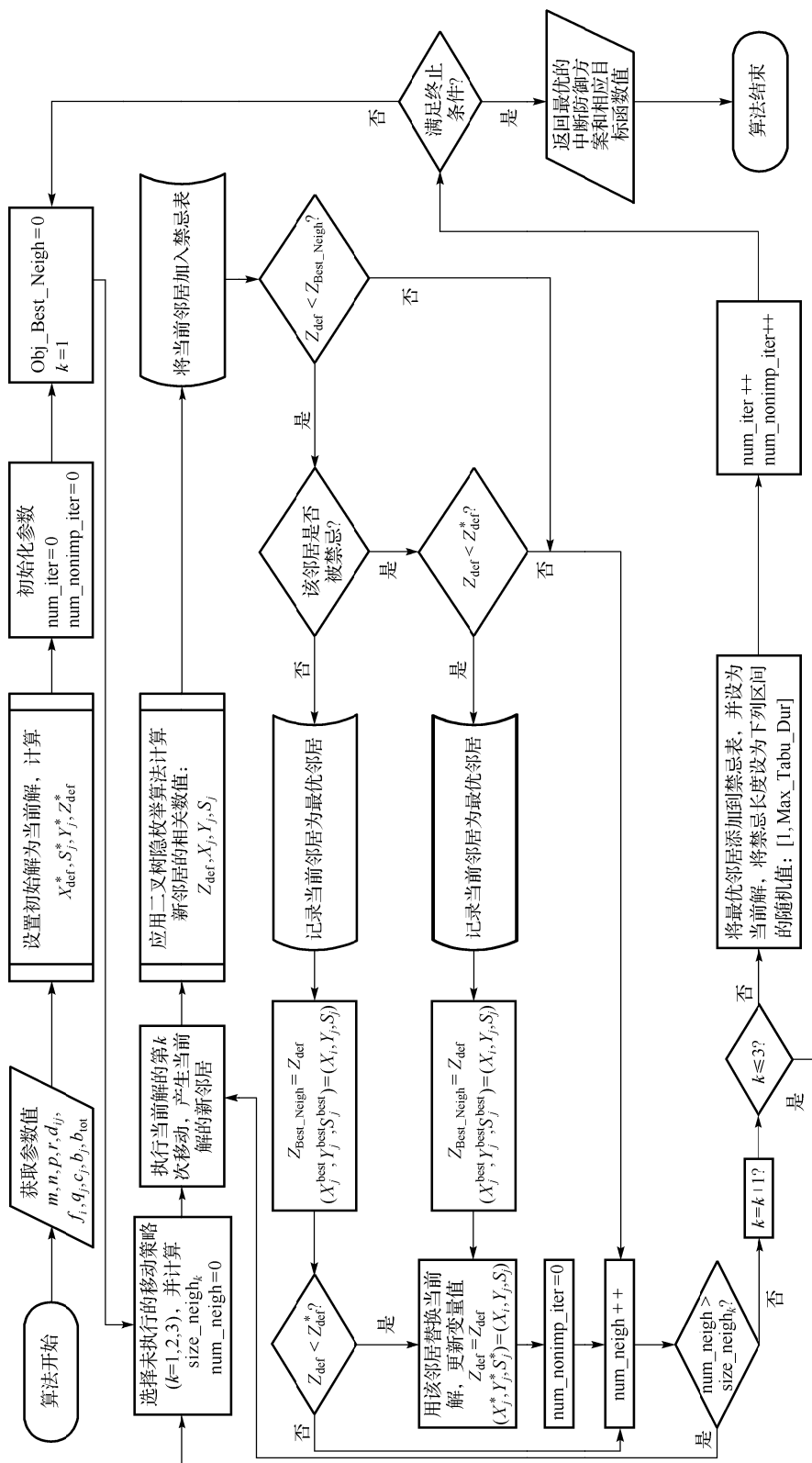


图 3.8 算法执行流程

3.4 保障中心选址算例

3.4.1 实验数据

现以在某保障区域内对群点保障中心选址为例，对本章所构建的选址模型和算法的有效性进行验证。某地域内有军械、装甲、车船、工化各类专业的修理单位 150 个，根据作战任务要求，上级有关部门决定将这 150 个器材需求点作为一个保障区域，在该区域内建立 10 个群点保障中心，对区域内的修理单位实施器材保障。为此，分两个步骤实施。第一步，决策部门向专家提交含 20 个点的备选点清单，并要求专家从这 20 个备选点中选择 15 个点作为候选保障中心；第二步，决策部门利用双层混合整数规划模型，从 15 个候选保障中心中确定 10 个点作为最终的群点保障中心开设地点。在第一步中，专家重点考虑选址结果对保障网络抗毁性的影响，对影响网络抗毁性的指标进行打分；在第二步中，确定群点保障中心的具体位置及与需求点之间的隶属保障关系，重点考虑网络运行成本，兼顾网络抗毁性设计要求。

3.4.2 初选阶段

现有三位装备保障方面的选址决策专家进行选址指标评价，专家根据 20 个备选点的具体情况，以自然语言评语集 $S = (S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6)$ （具体元素如表 3.2 所示）为打分内容，对各个群点保障中心备选点的自然条件、交通条件、安全条件、公共设施条件、政治及经济环境 5 个方面进行评价。三位选址决策专家给出的打分情况见附录中的专家 1、专家 2、专家 3 打分表。

假设所有决策专家中各个决策专家的权重相同，即 $\lambda = (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ 。各个选址评价指标的权重评价信息分为已知和未知两种情况。在权重评价信息已知的情况下，各个选址决策专家给出的权重评价信息为

$$R^1 = (HZ, Z, Z, HZ, YB)$$

$$R^2 = (FZ, HZ, HZ, Z, Z)$$

$$R^3 = (HZ, YB, HZ, YB, Z)$$

要求采用二元语义群决策方法，针对权重评价信息已知和未知两种情况，进行群

点保障中心选址决策,选择综合评价值最高的前 15 个备选点作为最终的候选群点保障中心。

该算例问题的选址实施过程如下。

首先,利用式(3.1)中的二元语义转换方法,将各个决策专家给出的具有语言形式的评价矩阵转化为二元语义决策矩阵,转换结果见附录中的专家 1、专家 2、专家 3 二元语义决策矩阵。

其次,采用二元语义加权算术平均 T-WA 算子[式(3.5)]对各个决策专家给出的二元语义决策矩阵进行集结,从而获得群体的二元语义决策矩阵,如表 3.4 所示。

表 3.4 集结后的群体的二元语义决策矩阵 **B**

	自 然 条 件	交 通 条 件	安 全 条 件	公共设施条件	政治及经济环境
备选点 1	(HH,0)	(HH,0)	(C,0)	(YB,-0.3)	(HH,-0.3)
备选点 2	(C,0)	(H,0)	(H,0.3)	(HC,0)	(H,0.3)
备选点 3	(C,0)	(H,0)	(YB,-0.3)	(C,0)	(HC,-0.3)
备选点 4	(H,0)	(HC,0.3)	(FH,-0.3)	(YB,0.3)	(H,0)
备选点 5	(H,0.3)	(YB,0)	(C,0.3)	(H,0.3)	(H,-0.3)
备选点 6	(H,0.3)	(YB,0.3)	(H,-0.3)	(C,0)	(YB,0)
备选点 7	(YB,0.3)	(YB,-0.3)	(HH,-0.3)	(YB,-0.3)	(YB,0.3)
备选点 8	(YB,0.3)	(YB,-0.3)	(H,0.3)	(H,-0.3)	(C,-0.3)
备选点 9	(YB,0)	(H,-0.3)	(H,-0.3)	(C,0.3)	(H,0.3)
备选点 10	(YB,0)	(C,0)	(C,0)	(H,0)	(YB,0)
备选点 11	(H,0.3)	(C,0.3)	(HC,0)	(H,-0.3)	(C,0.3)
备选点 12	(H,-0.3)	(FC,0.3)	(YB,-0.3)	(YB,-0.3)	(YB,0)
备选点 13	(YB,0)	(C,-0.3)	(YB,-0.3)	(H,-0.3)	(YB,0.3)
备选点 14	(HC,0.3)	(C,0.3)	(C,0)	(YB,0)	(YB,0.3)
备选点 15	(C,0)	(H,-0.3)	(YB,0)	(H,-0.3)	(C,-0.3)
备选点 16	(H,0.3)	(C,-0.3)	(C,0.3)	(YB,0)	(HH,0)
备选点 17	(H,-0.3)	(YB,0.3)	(HC,0.3)	(HC,0.3)	(C,0.3)
备选点 18	(C,0)	(C,0.3)	(YB,0)	(C,-0.3)	(YB,-0.3)
备选点 19	(YB,0)	(H,-0.3)	(C,0)	(H,-0.3)	(HH,-0.3)
备选点 20	(YB,0.3)	(H,-0.3)	(H,-0.3)	(C,0.3)	(C,-0.3)

(1) 权重评价信息已知的情況

利用式(3.1)中的二元语义转换方法,将各个决策专家给出的具有语言形式的权重评价信息转化为二元语义形式,如下

$$R^1 = ((Z,0),(FZ,0),(HZ,0),(YB,0),(BZ,0))$$

$$R^2 = ((FZ, 0), (FZ, 0), (HZ, 0), (YB, 0), (FBZ, 0))$$

$$R^3 = ((HZ, 0), (HZ, 0), (FZ, 0), (BZ, 0), (HBZ, 0))$$

然后, 则采用二元语义加权算术平均 T-WA 算子对各个决策专家给出的二元语义权重评价价值进行集结, 从而获得群体的二元语义指标权重评价价值如下

$$R = ((HZ, 0), (FZ, -0.3), (YB, 0.3), (YB, -0.3), (HBZ, 0))$$

利用式 (3.13) 进行转化和计算, 获得群点保障中心选址各个指标的权重值为

$$\omega = (0.2825, 0.3220, 0.1864, 0.1525, 0.0565)$$

采用二元语义加权算术平均 T-WA 算子, 利用式 (3.15) 对每个备选点的各个指标群体评价价值进行集结计算, 从而获得各个备选点的综合群体评价价值如下

$$\begin{aligned} X_1(\omega) &= (H, 0.07), X_2(\omega) = (YB, 0.05), X_3(\omega) = (C, 0.07), X_4(\omega) = (YB, 0.34), \\ X_1(\omega) &= (YB, 0.47), X_6(\omega) = (YB, 0.44), X_7(\omega) = (YB, 0.28), X_8(\omega) = (YB, 0.26), \\ X_9(\omega) &= (YB, 0.32), X_{10}(\omega) = (YB, -0.36), X_{11}(\omega) = (YB, -0.16), X_{12}(\omega) = (C, 0.23), \\ X_{13}(\omega) &= (YB, -0.35), X_{14}(\omega) = (C, 0.12), X_{15}(\omega) = (YB, -0.02), X_{16}(\omega) = (YB, -0.07), \\ X_{17}(\omega) &= (YB, -0.32), X_{18}(\omega) = (C, 0.28), X_{19}(\omega) = (YB, 0.24), X_{20}(\omega) = (YB, 0.26) \end{aligned}$$

各个群点保障中心备选点的优劣排序为

$$\begin{aligned} x_1 &> x_5 > x_6 > x_4 > x_9 > x_7 > x_8 > x_{20} > x_{19} > x_2 > x_{15} > x_{16} > \\ x_{11} &> x_{17} > x_{13} > x_{10} > x_{18} > x_{12} > x_{14} > x_3 \end{aligned}$$

则 $x_1, x_5, x_6, x_4, x_9, x_7, x_8, x_{20}, x_{19}, x_2, x_{15}, x_{16}, x_{11}, x_{17}, x_{13}$ 是在评价指标权重评价信息已知情况下的最终的候选保障中心开设点。

(2) 权重评价信息未知的情况

在权重评价信息未知的情况下, 首先采用偏差最大化方法, 利用式 (3.14) 进行计算, 获得群点保障中心选址各个指标的权重值为

$$\omega = (0.2124, 0.1307, 0.2484, 0.2061, 0.2024)$$

在获得各个指标的权重值后, 采用二元语义加权算术平均 T-WA 算子, 利用式 (3.15) 对每个备选点各个指标群体评价价值进行集结计算, 从而获得各个备选点的综合评价价值如下

$$\begin{aligned} X_1(\omega) &= (H, -0.28), X_2(\omega) = (YB, 0.09), X_3(\omega) = (C, 0.17), X_4(\omega) = (H, -0.07), \\ X_5(\omega) &= (H, -0.49), X_6(\omega) = (YB, 0.28), X_7(\omega) = (YB, 0.45), X_8(\omega) = (YB, 0.23), \\ X_9(\omega) &= (YB, 0.38), X_{10}(\omega) = (YB, -0.17), X_{11}(\omega) = (YB, -0.31), X_{12}(\omega) = (C, -0.34), \end{aligned}$$

$$X_{13}(\omega) = (YB, -0.04), X_{14}(\omega) = (C, 0.36), X_{15}(\omega) = (YB, -0.24), X_{16}(\omega) = (YB, 0.34), \\ X_{17}(\omega) = (YB, 0.27), X_{18}(\omega) = (C, 0.37), X_{19}(\omega) = (YB, 0.33), X_{20}(\omega) = (YB, -0.08)$$

各个群点保障中心备选点的优劣排序为

$$x_4 > x_1 > x_9 > x_8 > x_{19} > x_{10} > x_{14} > x_7 > x_{20} > x_5 > x_{11} > x_3 > \\ x_2 > x_{13} > x_{15} > x_{16} > x_{12} > x_{17} > x_{18} > x_6$$

则 $x_4, x_1, x_9, x_8, x_{19}, x_{10}, x_{14}, x_7, x_{20}, x_5, x_{11}, x_3, x_2, x_{13}, x_{15}$ 是在评价指标权重评价信息未知情况下的最终的候选保障中心开设点。

3.4.3 终选阶段

在第一阶段，假设权重评价信息未知，确定 15 个备选点，在终选阶段，需要从第一阶段的 15 个点中确定 10 个点作为最终的保障中心开设点。为了便于说明本书研究的双层选址模型与传统的 p 中值选址模型的区别，本算例用传统的 p 中值模型进行选址，并对选址结果运用 r 中断中值模型模拟对网络的攻击。为了方便表述，称 p 中值模型为 M_1 ，用 Z_p^B 表示 p 中值问题的最优目标函数值（ M_1 中断前的网络运行成本），用 Z_p^A 表示对 M_1 运用 r 中断中值模型求解的最优目标函数值（ M_1 中断后的网络运行成本）；本书的双层选址模型为 M_2 ，用 Z_{PR}^U 和 Z_{PR}^L 分别代表 M_2 的上层目标函数值和下层目标函数值，用 Z_{PR}^B 和 Z_{PR}^A 分别代表中断前、后的网络运行成本。

$$Z_{PR}^B = \frac{Z_{PR}^U - (1-\alpha)Z_{PR}^L}{\alpha}, Z_{PR}^A = Z_{PR}^L$$

这里的 α 代表网络正常运行的概率，那么 $1-\alpha$ 就表示网络的中断概率，本算例中取 $\alpha=0.5$ 。此处， $p=10$ ，设 $q=\sum_{j \in J} Y_j$ 表示被防御的点的数量， r 表示被攻击的点的数量，根据 p, q, r 值的不同求解了 5 种不同的情况， (p, q, r) 分别取 $(10, 5, 1)$ 、 $(10, 5, 2)$ 、 $(10, 6, 2)$ 、 $(10, 8, 4)$ 、 $(10, 9, 5)$ ，计算结果如表 3.5、表 3.6、图 3.9、图 3.10 所示。

表 3.5 中断前网络运行成本比较

序 号	p	q	r	Z_p^B	Z_{PR}^B	$\frac{Z_{PR}^B}{Z_p^B}$
1	10	5	1	14 785 421 396	15 118 119 857	1.022 5
2	10	5	2	8 030 381 377	9 323 518 581	1.161
3	10	6	2	4 767 376 494	5 392 013 734	1.131
4	10	8	4	8 030 381 377	8 485 025 239	1.056 6
5	10	9	5	4 767 376 494	4 819 539 864	1.010 9

表 3.6 中断后网络运行成本比较

序 号	p	q	r	Z_p^A	Z_{PR}^B	$\frac{Z_{PR}^B}{Z_p^B}$
1	10	5	1	57 181 201 559	41 261 973 647	0.721 6
2	10	5	2	46 405 600 786	29 085 643 969	0.626 8
3	10	6	2	29 716 135 321	17 798 580 324	0.599
4	10	8	4	24 282 092 133	17 950 882 823	0.739 3
5	10	9	5	13 089 312 531	11 095 299 305	0.847 7

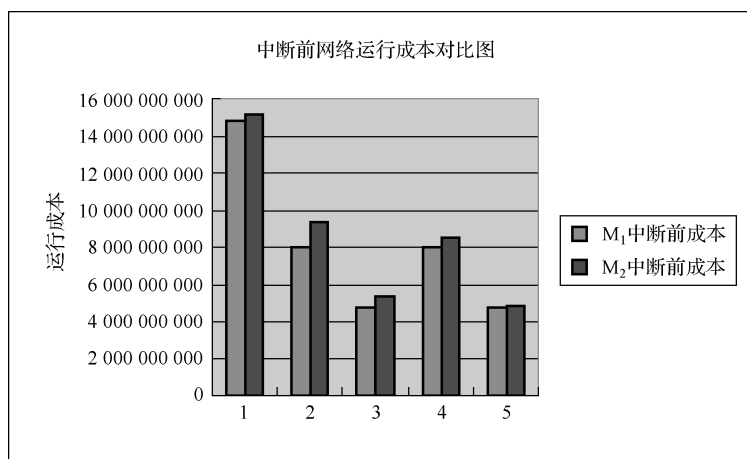


图 3.9 中断前网络运行成本对比图

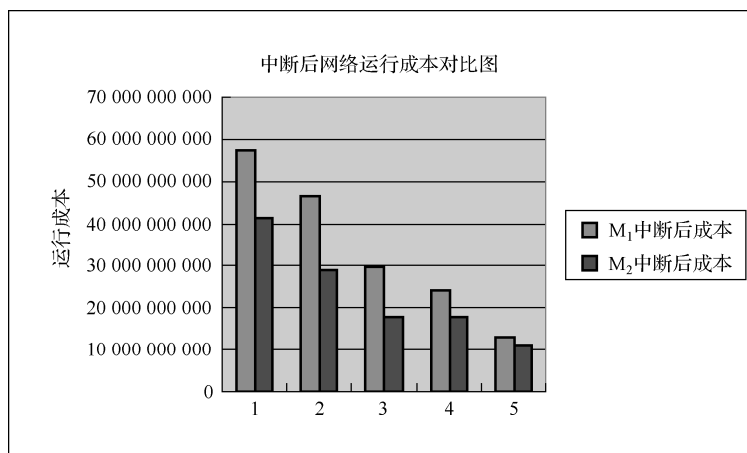


图 3.10 中断后网络运行成本对比图

从计算结果可以看出，在中断前， M_2 的运行成本 Z_{PR}^B 并不比 M_1 的运行成本 Z_p^B 低，在测试问题中 Z_{PR}^B 是 Z_p^B 的 1.01~1.16 倍，在中断后， M_2 的运行成本 Z_{PR}^A 则明显比 M_1 的运行成本 Z_p^A 低得多，在测试问题中 Z_{PR}^A 是 Z_p^A 的 59%~84%。由此可见，按照本书的选址思路，在正常情况下，网络运行成本会比按普通的 p 中值选址模型计算的运行成本稍微偏高，但是当发生应急情况，网络中的资源点面临中断威胁时，本书所研究

的选址模型就表现出比普通 p 中值选址模型更强的抗毁性。

图 3.11~图 3.14 所示为 $p=10$ 、 $q=9$ 、 $r=5$ 的情况下, M_1 、 M_2 中断前、后的求解结果。图中, 正方形代表保障中心节点, 菱形代表中断的保障中心节点, 小圆点代表中断后分配的需求点, x 轴和 y 轴代表节点的坐标位置, 图中数字代表节点编号。图 3.11 中描绘了 10 个中值问题的最优解 (M_1 中断前), 图 3.12 是在 p 中值问题最优解的情况下网络遭到中断, 用 r 中断中值模型的求解结果 (M_1 中断后), 图 3.13 表示运用本书所研究的双层选址模型的求解结果 (M_2 中断前), 图 3.14 代表有 5 个保障中心被中断的情况下的求解结果 (M_2 中断后)。图中的连线表示需求点与保障中心的建制供应关系。

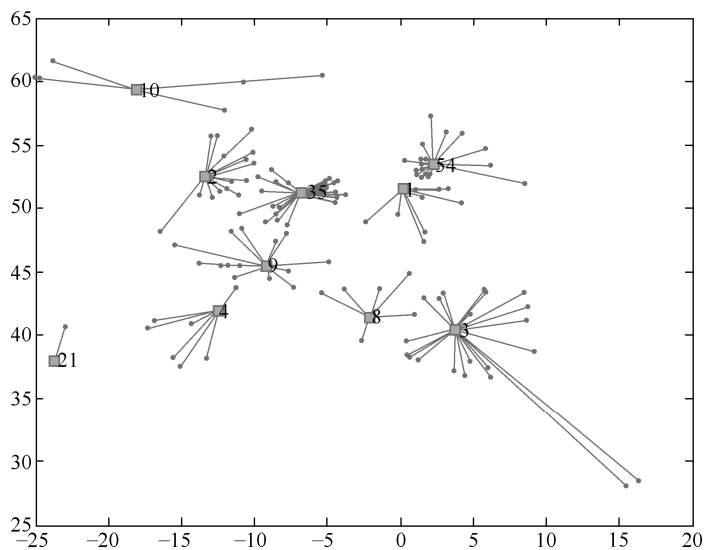


图 3.11 M_1 中断前求解结果

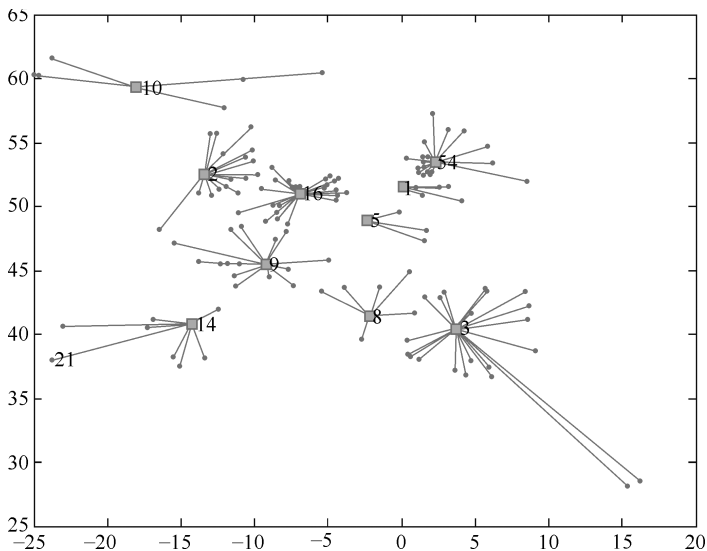
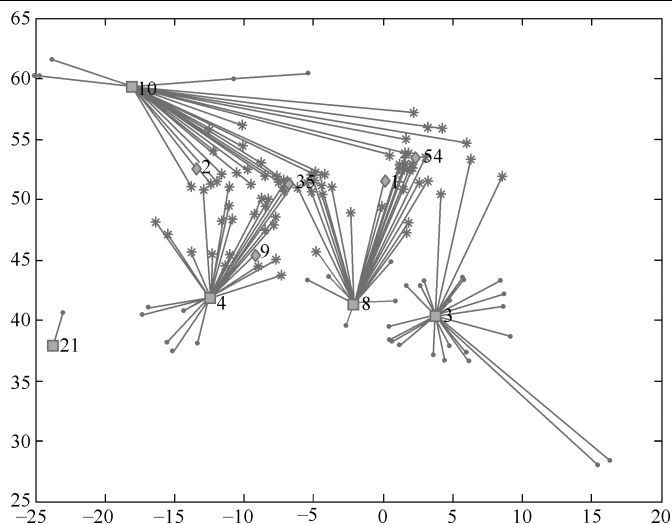
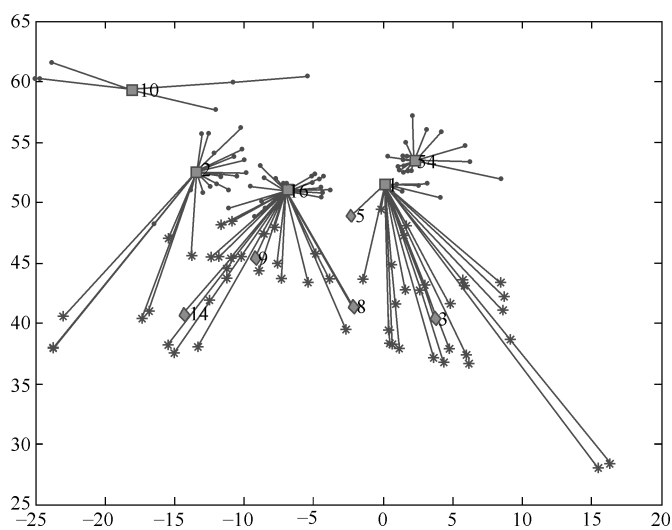


图 3.12 M_2 中断前求解结果

图 3.13 M_1 中断后求解结果图 3.14 M_2 中断后求解结果

通过对图 3.11~图 3.14 的分析,可以得出为什么本书研究的双层选址模型比普通 p 中值选址模型具有更强的抗毁性。由图中可以发现, M_1 与 M_2 的主要区别在于是选择节点 21 还是节点 5 建立保障中心,而节点 35 与节点 16 几乎处于同一位置,在正常情况下, M_1 模型中选择节点 21 比 M_2 模型中选择节点 5 更加有效,但只服务一个节点的节点 21 远离了其他的需求点,当中断发生后,节点 21 不能接受新的需求点。因此,当中断发生后, M_1 的最优目标值从 14 785 421 396 增大到 57 181 201 559,而 M_2 的最优目标值从 15 118 191 857 增大到 41 261 973 647,增大幅度出现较大差异, M_2 表现出更强的抗毁性。

3.5 本章小结

本章对装备器材保障网络设计的关键环节（网络中各级保障中心的选址）进行了深入研究。为了将抗毁性和经济性纳入网络设计属性，将选址分为两个阶段，第一阶段重点考虑抗毁性设计要求，第二阶段重点考虑经济性设计要求。研究表明，本书所设计的两阶段选址方法能够有效满足装备器材保障网络兼顾抗毁性和经济性的设计要求。

传统的选址模型通常从服务成本、服务质量、服务效率等角度考虑，考虑选址结果对网络抗毁性影响的研究非常少。本书所设计的两阶段选址方法丰富和完善了选址理论与方法在网络设计中的应用，为探索如何构建适应平时与战时运行的装备器材保障网络进行了有益的尝试。

第4章 装备器材保障网络抗毁性度量方法

各级保障中心选址一旦确定，装备器材保障网络结构就确定了。那么建立的保障网络的抗毁性究竟如何呢？哪些指标可以作为网络性能的衡量标准？在面对攻击的情况下网络性能会有怎样程度的变化？在第3章的研究基础上，本章将对这些问题进行解答。

本章内容安排如下：首先建立保障网络抗毁性研究框架，然后对各项抗毁性指标进行具体分析和阐述，设计抗毁性指标的关键算法，最后，为了评估网络应对打击的能力，结合装备器材保障网络在未来可能遭遇的战场环境类型，分别将保障网络置于信息对称和信息不对称这两种模式下，观察并分析抗毁性测度的变化规律，得出装备器材保障网络抗毁性结论。

4.1 装备器材保障网络抗毁性测度建立原则及研究框架

4.1.1 抗毁性测度建立原则

复杂的事物都具有众多的影响因素，将每个因素都考虑得很清楚是不可能的，而只对部分因素过分地精确化，也没有太大的实际意义。因此，抗毁性测度的选择与建立需要充分考虑系统性、合理性和针对性，不能一味追求指标的精确性。对于装备器材保障网络抗毁性测度的构建，应遵从以下三个原则。

（1）系统性原则

装备器材保障网络是一个有较强层次结构的网络，这在前面的保障网络特点分析中已经指出，因此，在构建保障网络抗毁性测度时，应当从系统性角度全面地反映这种层次结构关系。

（2）合理性原则

合理性就是符合客观规律的真实属性。在设计抗毁性测度指标时，首先以科学的

理论为指导,使评价指标能够抓住评价对象的实质,在逻辑结构上严谨、合理,能够全面反映评价对象的核心与本质。对于装备器材保障网络,其核心是要评估它的业务保障能力,如是否能在器材数量上满足需求,是否能在有效的时间内将器材配送到需求单位,配送过程中器材损失程度怎么样,等等。因此,在构建抗毁性测度指标时需要全面考虑这些核心要素。

(3) 针对性原则

通常情况下,不同网络系统的抗毁性评价指标不相同。尽管它们具有相似性,且某些子指标体系可能完全相同,但是在很多方面的具体细节上仍然存在一定的差别。因此,在构建抗毁性测度指标时,需针对各系统做分析,做到具体问题具体分析,以便使建立的评估指标能够真实地反映系统的实际抗毁性水平。装备器材保障网络抗毁性测度指标以评估业务抗毁能力和拓扑结构抗毁能力为目标,追求每个指标都能够从不同侧面客观地反映系统的评估目标,同时注重评估方法的实用性和可操作性,达到理论与实践相结合的目的。

4.1.2 抗毁性测度研究框架

在第2章中,将装备器材保障网络分为物理层和业务层,因此,研究装备器材保障网络的抗毁性测度,也应当从物理层抗毁性和业务层抗毁性两个方面入手,才能系统、全面地反映网络的抗毁性本质。其中,在研究物理层抗毁性时,不考虑业务,主要从拓扑结构角度研究网络自身的一些特性;在研究业务层抗毁性时,需要根据网络的主要职能及部队对保障网络的要求来设计抗毁性测度指标,即根据保障业务研究其抗毁性。

优良的拓扑结构可以提高网络系统的抗毁性,能够适应不同的网络环境:在网络外部环境较优时,网络能够以好的网络效率提供最优的服务效率;在网络外部环境恶劣时,网络能够以好的鲁棒性保持网络的可用性。因此,可选择网络效率和网络鲁棒性作为网络拓扑结构抗毁性的测度指标。在保障业务抗毁性指标上,选择器材到达率和用户等待时间作为其测度指标,这是因为装备器材保障网络由于其具有军事特性,对器材的数量、供应时间有很高的要求,特别是在战时,这种要求体现得更为明显,而器材到达率和用户等待时间分别从器材保障的数量和时间上刻画了部队需求点对保障网络的这一要求。

装备器材保障网络的抗毁性测度理论研究框架如图4.1所示。

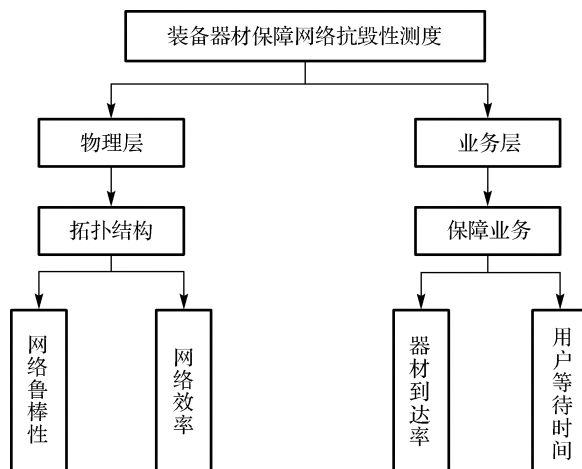


图 4.1 装备器材保障网络的抗毁性测度理论研究框架

4.2 装备器材保障网络抗毁性测度

网络抗毁性目前是复杂网络的研究热点，Ellison R J 等人^[46]给出了网络抗毁性的基本定义：网络系统在遭受攻击、故障和意外事件时仍能够及时完成其关键任务的能力。后续学者关于抗毁性的定义基本上都是该定义的延伸。抗毁性可以分为静态抗毁性和动态抗毁性。静态抗毁性是指按照一定的策略移除网络中的节点或边后研究网络的相关特性，这些失效的节点不会产生“联动”效应，但是会对网络的整体拓扑结构和网络性能产生影响。Albert 等人将随机网络和无标度网络分别置于随机打击和蓄意攻击下研究复杂网络特性的相关工作都属于静态抗毁性研究的范畴。动态抗毁性是指当网络中的部分节点失效时，会导致其他节点也可能失效，其他失效的节点再影响别的邻居节点，失效带来的影响通过一定的“级联”模式不断传递下去，直到整个网络系统满足某一个平衡条件为止，是从动态的角度来研究网络的相关特性的。常见的动态抗毁性模型有负荷-容量模型、二值影响模型、沙堆模型、OPA 模型、CASCADE 模型。本书所研究的抗毁性是指静态抗毁性。

抗毁性测度是网络抗毁性大小的衡量指标。在网络抗毁性测度设计方法研究上，目前仅见到国内明亮等人^[142]提出了一套包含测度提取方法、测度体系和测度度量方法在内的较为完整的系统解决方案，但该方法框架没有经过实践检验，其实用性尚未可知。文献 7、文献 44、文献 45 分别针对证券交易网络、军事通信网络及铁路网设计了相应的抗毁性测度，这些抗毁性测度也缺乏通用性，仅适用于他们各自研究的网络系统，但是他们设计的抗毁性测度在本质上还是有重叠的地方的。从现有的文献情况

可以得出结论, 目前还没有统一的抗毁性测度研究方法体系, 所设计的抗毁性测度具有一定的共性, 大多数是基于图论和复杂网络相关参数进行设计的。

4.2.1 网络物理层抗毁性测度

1. 网络鲁棒性

鲁棒性 (Robustness) 来源于统计学, 20 世纪 70 年代初开始在控制理论的研究中开始流行, 用来表征控制系统对特性或参数摄动的不敏感性。本书采用的装备器材保障网络鲁棒性的定义如下。

定义 4.1 网络鲁棒性 网络鲁棒性 η_R 用来衡量移除网络中任意一个节点后网络中剩余节点之间仍能够保持连通能力的平均影响, 也就是移除任意节点后网络中仍然连通的节点对数与网络中未遭受攻击时总节点对数之比的均值, 即

$$\eta_R = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \in G_k} \sum_{j \neq i \in G_k} l_{ij}$$

其中, G_k 表示移除任意节点后网络中剩余节点的集合; l_{ij} 为节点 i 到节点 j 的连通参数, 即若节点 i 到节点 j 之间有路径连通, 则 $l_{ij} = 1$, 否则 $l_{ij} = 0$ 。

网络鲁棒性描述了移除节点后网络的连通性, 反映了网络被分割的情况, η_R 的取值范围为 $[0,1]$, 值越小, 说明网络中不连通的节点对越多, 网络被分割的程度越严重。

2. 网络效率

在高负载或网络部分失效的情况下, 一些节点或边将会出现阻塞和故障, 在一些路段, 在途的运输物资将采取迂回的形式继续完成器材物资的保障任务, 从而导致网络的物资输送效率降低。当网络中的很多节点和边出现阻塞或故障时, 保障网络将被分割成一些子网络, 节点间的连通性遭到破坏, 可能导致没有可行的迂回路径。具有良好抗毁性的保障网络在某个节点或边出现故障或阻塞时, 网络的运输效率变化值应当控制在一个可接受的范围内, 否则, 说保障网络的抗毁性差。为此, 定义网络效率测度来衡量网络应对这种由于高负载或网络部分失效带来的运行效率变低的能力。

定义 4.2 网络效率 (η_E) 整个网络的效率定义为网络中任意两个节点对之间最短距离倒数之和的平均值, 即

$$\eta_E = \frac{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{1}{d_{ij}}}{n} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i \geq j} \frac{1}{d_{ij}}$$

网络效率反映了网络的连通能力，能够表征全局网络的拓扑结构抗毁性。当网络有很好的连通性和很高的效率时， η_E 越大。令 η_{E0} 表示网络在正常情况下的效率，则突发事件发生后网络效率与正常情况下的网络效率的比值，能够反映突发事件对网络运行的影响程度，将其定义为

$$\xi = \frac{\eta_E}{\eta_{E0}}$$

4.2.2 网络业务层抗毁性测度

1. 器材到达率

装备器材保障网络的根本目的是为部队需求提供坚强有力的器材服务保障，满足装备维修的器材需求，保证装备在发生故障或战损后，不会因为缺少维修器材而得不到及时有效的维修。因此，器材到达率是衡量装备保障网络业务层抗毁性的重要方面，对器材到达率进行如下定义。

定义 4.3 需求点 i 的器材到达率 (ψ_i) 某个需求点的器材到达率 ψ_i 定义为实际到货量与原始需求量的比值，即

$$\psi_i = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 - Q_1 - Q_2}{Q_0}$$

式中， Q_0 表示器材的原始需求量。某时刻网络发生部分节点中断，导致部分器材流受到影响。这部分受影响的器材流分为两类：第一类器材流还可以通过路径迂回继续完成保障任务；第二类器材流所在的路径两端的节点都被中断了，这部分器材流被孤立，考虑用户最大等待时间的限制，认为这部分器材流在最大等待时间内无法完成保障任务，用 Q_2 表示。第一类器材流经过重新路由，虽然最终能够到达需求点，但是供应时间可能会超出最大等待时间的限制，对于超出时间限制的这部分器材流，我们认为没有完全满足需求点的器材需求，通过惩罚因子对其惩罚，这部分器材用 Q_1 表示，它在数值上等于惩罚因子与实际到货量的乘积。对于通过路径迂回在保障时间范围内到达需求点的这部分器材，认为满足了需求点的器材需求。在计算器材到达率时，假设网络中各保障点的器材库存量充足，能够从品种和数量上满足需求点的器材需求。

显然， ψ_i 越大，说明网络的抗毁性越好， ψ_i 越小，说明网络的抗毁性越差，器材到达率实质上是对突发情况下器材损失程度的衡量指标。

定义 4.4 网络的器材到达率 (ψ) 定义整个网络的器材到达率为各需求点器材

到达率的平均值，即

$$\psi = \frac{\sum_{i \in N} \psi_i}{n}$$

2. 用户等待时间

器材到达率指标从器材的数量上衡量了保障网络的业务层抗毁性的高低，由于保障网络具有军事特性，网络中的需求点对器材物资到货时间有特殊的要求，特别是在应急情况下，用户等待时间应当控制在一定的范围内。若超出用户等待时间的最大限制，则器材将失去其军事价值。为此，非常有必要从保障时间角度设计相应的业务层抗毁性测度指标。这里，用用户等待时间来作为衡量指标，将其定义如下。

定义 4.5 需求点 i 用户等待时间（ WT_i ） 定义某需求点的用户等待时间为某个需求点 i 从发出需求时刻到收到全部器材时刻的时间间隔，即

$$WT_i = T_{\text{end}} - T_{\text{start}}$$

当网络发生服务中断，原始需求不能全部被满足时， T_{end} 代表用户最大等待时间。

定义 4.6 网络平均用户等待时间（ WT ） 定义网络平均用户等待时间为所有需求点的用户等待时间的平均值，即

$$WT = \frac{WT_i}{n}$$

4.2.3 计算抗毁性测度的关键算法设计

前面从网络拓扑结构和保障业务的角度分别定义了抗毁性测度，接下来将设计相应的算法，对于给定的网络，通过相应的算法计算各测度指标的大小。通过观察各抗毁性指标计算公式的构成不难发现，在拓扑结构抗毁性测度指标中，对于给定的网络，网络鲁棒性的计算较为简单，而网络效率只与网络中的最短路径相关。保障业务抗毁性测度指标的计算则相对复杂，需要设计专门的算法。本节将对关键算法进行设计，算法基于 Visual Studio 2005 平台，使用 C# 语言实现并测试通过。

首先对条件进行假设，并对相关符号进行说明。

假设 1：由于研究的侧重点是保障网络的抗毁性，侧重于网络的拓扑结构及其应急条件下保障业务应对策略，因此，假设任何时刻网络中的器材库存量都是充足的，器材品种和数量能够满足需求点的任何需求。

假设 2: 定义两个节点间的物理距离为空间距离, 两个节点间的平均自由行驶时间为时间距离。

假设 3: 网络中, 器材流从服务提供者通过连接节点流向服务接收者, 具有固定的流向, 因此把网络视为有向加权网络, 边的权重是其空间距离。

假设 4: 忽略配送车辆通过节点的时间, 当一个节点遭到破坏时, 所有与该节点有关且未通过该节点的器材流将返回当前边的上游或下游节点, 并以部队需求点为终点, 重新建立供应路径。这将导致两种情况: 一种是由于路径被孤立, 重新路由不成功; 另一种是能够找到到达终点的新路径。为了降低算法实现的复杂度, 忽略返回上游或下游节点所需的时间。

假设 5: 由于没有考虑节点的可修复性, 因此在攻击方面也只考虑网络遭到单次攻击, 不考虑遭到连续攻击的情况, 但是单次攻击可同时中断多个节点。

相关符号如下。

$G = (\text{Matrix_X}, \text{Matrix_L}, \text{Matrix_T}, \text{Matrix_D})$: 保障网络, 其中 Matrix_V 表示网络中的顶点集, Matrix_L 表示网络中的边连接矩阵, Matrix_T 、 Matrix_D 分别表示网络的空间距离矩阵和时间距离矩阵。

$\text{Matrix_V} = \{V_i\}$: 顶点集合, 表示网络 G 中的所有节点。

$\text{Matrix_L} = \{L_{ij}\}$: 连接矩阵, 矩阵元素要么为 1, 要么为 0, 表示某时刻整个网络任意两个节点间的连接状态。 $L_{ij} = 1$ 表示节点 i 、 j 处于连通状态, $L_{ij} = 0$ 表示节点 i 、 j 处于非连通状态。

$\text{Matrix_T} = \{T_{ij}\}$: 时间距离矩阵, 表征了网络在某个时刻任意两个节点之间的平均自由行驶时间, 节点 i 、 j 不连通 ($L_{ij} = 0$) 时, $T_{ij} = \infty$ 。

$\text{Matrix_D} = \{D_{ij}\}$: 空间距离矩阵, 表征了网络在某个时刻任意两个节点之间的物理距离 (网络边的长度), 节点 i 、 j 不连通 ($L_{ij} = 0$) 时, $D_{ij} = \infty$ 。

$\text{Matrix_R} = \{R_{ij}\}$: 供应矩阵, 资源点 i 向需求点 j 供应 R_{ij} 数量的器材, 表征了某次供应决策的结果, 包括供应与被供应的关系及供应的数量。

$\text{Matrix_F} = \{F_{ij}\}$: 流量矩阵, 表征了网络在某时刻器材保障物资在网络边上的数量分布。其中, 每个资源点按照一定的时间间隔向需求点发放器材物资, 每次发放形成一个器材流。

$\text{Matrix_I} = \{I_i\}$: 中断集合, 表征了网络在某时刻各节点的中断情况, 节点 i 被中断时 $I_i = 1$, 否则 $I_i = 0$ 。

$\text{Matrix_DM} = \{\text{DM}_{ij}\}$: 最短路矩阵, 其中元素 DM_{ij} 是一个由节点序号构成的变量, 表示某时刻任意节点 i 、 j 之间的最短路径所经历的节点集合。

Max_T: 用户最大等待时间, 表示用户从发出需求到收到器材物资的最大忍耐时间。

1. 网络最短路径算法

分析拓扑结构抗毁性测度的计算公式, 不难发现关键在于计算某时刻网络中任意两点之间的最短路径。在计算加权网络中的最短路径算法中, 目前公认的最好方法是于 1959 年由 Dijkstra 提出来的 Dijkstra 算法, 本书选择该算法作为网络中最短路径算法。在计算过程中, 选择空间距离作为网络边的权值。

目的: 采用 Dijkstra 算法计算任意两个节点 V_{start} 、 V_{end} 之间的最短距离

输入: $G = (\text{Matrix_X}, \text{Matrix_L}, \text{Matrix_T}, \text{Matrix_D})$

输出: DM_{ij}

算法如下。

步骤 1: 将点 V_{start} 标记为 P 标号, 与 V_{start} 直接相连的节点标记为 T 标号, 并令 $P(V_{\text{start}}) = 0$, 标记为 T 标号的节点的 $T(V_i) = \infty$ 。

步骤 2: 若 V_i 点为刚得到的标记为 P 标号的点, 则考虑与该点直接相连的标记为 T 标号的节点 $\{V_1, V_2, \dots, V_j, \dots\}$, 在该集合中寻找满足下式的节点 V_j

$$T(V_j) = \min\{T(V_j), P(V_i) + D_{ij}\}$$

步骤 3: 比较当前网络中所有具有 T 标号的节点, 把 T 值最小的节点改为 P 标号节点, 即

$$P(V_j) = \min\{T(V_j)\}$$

当 T 值存在多个同样的最小值时, 可同时将其改为 P 标号节点, 同时记录路径 $E_{ij} = \{V_i \rightarrow V_j\}$ 。

步骤 4: 如果全部节点均为 P 标号或 V_{end} 节点被标记为 P 标号, 则转步骤 5 停止计算并输出结果, 否则, 转步骤 2。

步骤 5: 结果输出。根据 $\{E_{ij}\}$, 寻找从 V_{end} 到 V_{start} 的路径所经过的节点集合 $\{V_{\text{end}}, \dots, V_{\text{start}}\}$, 该路径的逆向路径即为从 V_{start} 到 V_{end} 的最短路径集合, 最短路径上的路径长度相加, 其结果即为 DM_{ij} 。

2. 保障业务抗毁性测度关键算法

保障业务抗毁性测度与网络拓扑结构抗毁性测度不同, 它与具体的保障业务有关,

即保障业务抗毁性测度的计算需要先假设业务背景。为此,假设某次器材物资保障业务为多个保障中心节点向一个需求点同时展开配送业务,某时刻网络中的部分节点遭到中断,我们的目的是根据中断情况计算本次配送保障的器材到达率及每个用户的等待时间。为了便于阐述,结合图 4.2 进行阐述。图 4.2 所示为器材配送示意图,用图形的形式表示了供应关系矩阵中的一个元素,表示由节点 V_{start} 向节点 V_{end} 供应器材,计划最优路线为 $V_{\text{start}} \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_{\text{end}}$,当前器材流正位于节点 V_1 和节点 V_2 所构成的边 E_{12} 上。

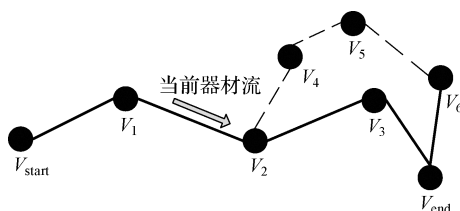


图 4.2 器材配送意图

输入： $G = (\text{Matrix_V}, \text{Matrix_L}, \text{Matrix_T}, \text{Matrix_D})$ 、 $\text{Matrix_F} = \{F_{ij}\}$ 、 $\text{Matrix_I} = \{I_i\}$ 、 $\text{Matrix_R} = \{R_{ij}\}$ 、 Max_T

输出： ψ_i 、 WT_i

算法如下。

步骤 1：配送保障业务开始时刻，设置时钟变量 $\text{TimeIndex}=1$ 。

步骤 2：若 $\text{Matrix_R} = \{R_{ij}\}$ 中的每个供应关系的状态为“按时完成”或“超时完成”，则跳转到步骤 5。

步骤 3：更新网络中的器材流分布，更新规则如下。

步骤 3.1：循环 Matrix_R ，即循环每个供应关系，每个供应关系代表一个器材流。

步骤 3.2：判断器材流在当前边的停留时间。若停留时间大于当前边的平均自由行驶时间，并且当前边不包含目标需求点，则器材流进入计划最优路径的下一条边。若包含目标需求点且 $\text{TimeIndex} \leq \text{Max_T}$ ，则将该器材流的状态更新为“按时完成”；若包含目标需求点且 $\text{TimeIndex} > \text{Max_T}$ ，这部分器材属于超时到达需求点，将该器材流的状态更新为“超时完成”，同时将该器材流累加到 Q_i 。不论是“按时完成”还是“超时完成”保障任务，都记录该需求点获得器材所花费的时间 $\psi_i = \text{TimeIndex}$ 。

步骤 4：检查 Matrix_I 是否为空，如果不为空，那么说明当前时刻网络遭到攻击，造成部分节点中断，则进行如下操作。

步骤 4.1: 循环 Matrix_R ，即循环每个供应关系，每个供应关系代表一个器材流。

步骤 4.2: 检查当前器材流所在边的两端的节点（如图 4.2 中的 V_1 和 V_2 ）是否同时被破坏（检查 Matrix_I 是否同时包含这两个节点），如果是，那么说明这部分器材不能被送到需求点，累加当前器材流到变量 Q_2 上。

步骤 4.3: 如果仅上游节点被破坏（如图 4.2 中的 V_1 ），那么进行如下操作。

步骤 4.3.1: 如果计划最优路径中剩余的节点没有被破坏，那么按照原定计划继续完成保障，网络中断没有对当前器材流造成影响。

步骤 4.3.2: 如果计划最优路径中剩余的节点中至少有一个节点被破坏（如图 4.5 中的 V_3 ），那么以当前器材流的下游节点（如图 4.2 中的节点 V_2 ）为起点，以需求点为终点（如图 4.5 中的 V_{end} ），重新分配路由，确定新的配送方案。

步骤 4.4: 如果仅下游节点被破坏（如图 4.2 中的 V_2 ），那么器材流返回到当前流的上游节点（如图 4.2 中的 V_1 ），以上游节点为起点，以需求点为终点（如图 4.2 中的 V_{end} ），重新分配路由，确定新的配送方案。

步骤 5: 算法结束，根据 ψ_i 、 WT_i 计算公式输出结果。

4.3 装备器材保障网络抗毁性仿真实验

为了研究本书所构建的装备器材保障网络在面对攻击时抗毁性的变化，结合保障网络在未来战场上可能遇到的攻击模式，分别将保障网络置于信息对称和信息不对称两种攻击模式下，分析抗毁性测度的变化规律。其中，信息对称攻击指敌我双方获取信息的能力势均力敌，攻击方对所要攻击的保障网络所掌握的信息无法用于制定有效的、有针对性的打击策略。信息不对称攻击指攻击方拥有绝对的信息优势，对所要攻击的网络的相关信息掌握准确、全面，这些信息可以有效地辅助制定攻击策略，从而进行有针对性的打击。网络失效可以分为由于随机因素造成的网络失效和由于蓄意攻击造成的网络失效两种情况，根据信息对称和信息不对称两种情况下的攻击特点，将信息对称攻击抽象为网络的随机攻击，将信息不对称攻击抽象为网络的蓄意攻击。

4.3.1 仿真实验数据环境

为了尽可能使仿真实验数据环境具有代表性，我们选择一个路网要素较完善的地区作为研究区域。假设该区域内有军械、装甲、车船、工化各专业各级别的修理单位 34 个，将这些单位视为器材需求点。铁路和公路是该区域中主要的运输通道，其中有 3 条

国道和 4 条铁路干线，它们构成了该区域道路交通网络的边。公路和铁路、公路和公路、铁路和铁路之间存在交叉路口，将这些交叉路口作为网络的交通枢纽连接节点。根据部队需求点在该区域的地理分布及部队的作战任务，通过第 3 章的选址决策模型和算法，在该区域中设置 8 个群点保障中心、1 个区域保障中心，它们负责保障该区域内 34 个部队需求点的器材需求。资源点、需求点及相关地理情况分布如图 4.3 所示。

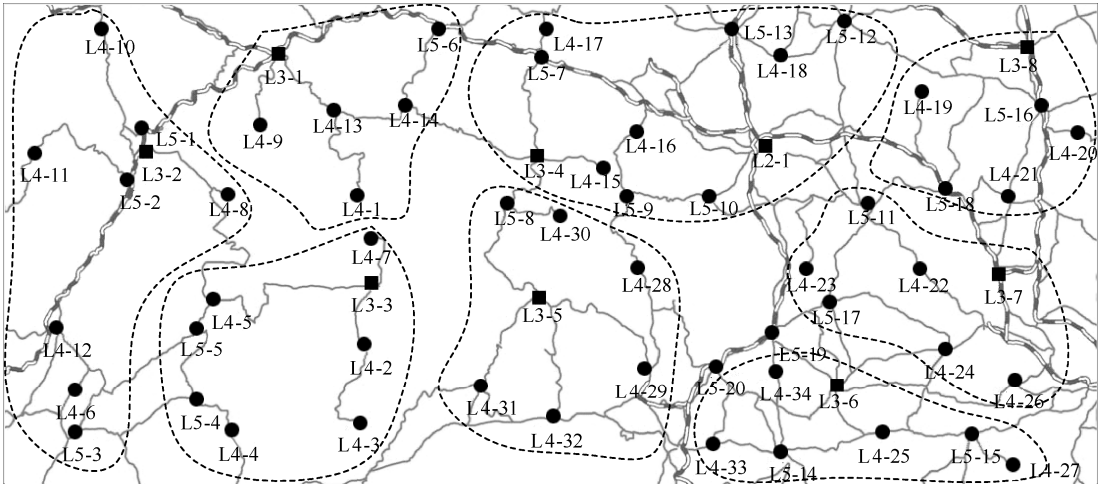


图 4.3 资源点、需求点及相关地理情况分布

网络中主要包含公路和铁路，不同运输方式的平均行驶速度如表 4.1 所示^[34]。

表 4.1 不同运输方式的平均行驶速度

序 号	运 输 方 式	平均行驶速度/(km/h)
1	公路	60
2	铁路	80

利用 SuperMap DeskPro 软件，测得各路段在不同运输方式下的距离如表 4.2 所示。

表 4.2 各路段在不同运输方式下的距离

始 点	终 点	路段距离/km	运 输 方 式	始 点	终 点	路段距离/km	运 输 方 式
L2-1	L5-13	39.8	铁路	L2-1	L5-10	18.7	公路
L2-1	L5-11	24.3	公路	L5-13	L4-8	9.8	公路
L2-1	L5-11	23.1	公路	L2-1	L5-19	43.7	铁路
L4-8	L5-12	10.7	公路	L5-12	L5-16	59.8	公路
L5-16	L3-8	20.1	铁路	L5-16	L4-2	76.0	公路
L5-16	L4-21	20.0	公路	L4-21	L3-7	20.8	公路

续表

始 点	终 点	路段距离/km	运 输 方 式	始 点	终 点	路段距离/km	运 输 方 式
L5-12	L5-11	60.3	公路	L5-11	L5-18	20.8	公路
L5-18	L4-19	20.7	公路	L5-18	L3-7	22.1	铁路
L5-11	L4-22	19.9	公路	L4-22	L4-24	24.8	公路
L4-24	L4-26	26.0	公路	L4-26	L5-15	23.2	公路
L5-15	L4-27	56.0	公路	L5-15	L4-25	16.4	公路
L4-24	L4-25	25.4	公路	L4-25	L3-6	10.0	公路
L4-24	L3-6	20.2	公路	L4-24	L5-17	20.8	公路
L5-17	L5-11	20.0	公路	L5-11	L4-23	27.6	公路
L4-25	L5-14	20.8	公路	L5-14	L4-34	20.0	公路
L5-14	L4-33	18.9	公路	L4-33	L4-29	29.8	公路
L4-29	L4-32	24.5	公路	L4-29	L4-28	24.0	公路
L4-28	L5-9	17.8	公路	L5-10	L5-9	20.1	公路
L5-9	L4-16	29.7	公路	L4-16	L5-7	40.3	公路
L5-7	L5-6	22.6	铁路	L5-7	L4-17	38.0	公路
L5-7	L3-4	24.9	公路	L3-4	L4-15	18.9	公路
L3-4	L5-8	17.6	公路	L5-8	L4-30	9.8	公路
L5-8	L3-5	28.8	公路	L3-5	L4-29	35.6	公路
L3-5	L4-32	27.8	公路	L4-32	L4-31	20.1	公路
L4-31	L3-5	25.0	公路	L3-4	L4-14	39.8	公路
L4-14	L5-6	20.0	公路	L5-6	L3-1	43.0	铁路
L4-14	L4-13	20.0	公路	L4-13	L3-1	20.8	公路
L4-13	L4-1	26.8	公路	L3-1	L4-9	20.8	公路
L3-1	L5-1	40.8	铁路	L5-1	L3-2	18.0	铁路
L3-2	L4-8	24.9	公路	L4-8	L4-5	39.9	公路
L4-5	L3-3	50.8	公路	L3-3	L4-7	16.0	公路
L3-3	L4-2	18.0	公路	L4-2	L4-3	22.0	公路
L4-5	L5-5	8.9	公路	L5-5	L5-4	4.9	公路
L5-4	L4-4	10.8	公路	L5-5	L5-3	38.8	公路
L5-3	L4-6	87.0	公路	L5-3	L5-4	33.0	公路
L4-6	L4-12	18.3	公路	L5-5	L4-12	53.2	公路
L4-12	L5-2	50.9	铁路	L3-2	L5-2	10.0	铁路
L5-2	L4-11	20.1	公路	L5-1	L4-10	22.3	公路
L5-18	L2-1	29.7	铁路	L5-19	L4-34	10.7	公路
L3-7	L4-22	30.1	铁路	L4-33	L5-20	10.9	公路
L5-20	L4-29	20.0	铁路	L5-10	L5-9	20.1	公路

最后，为了便于研究和计算，按照第 2 章介绍的方法将网络中的节点和边投影到规则圆内，映射网络如图 4.4 所示，接下来的各项指标计算过程将在图 4.4 的基础上进行。

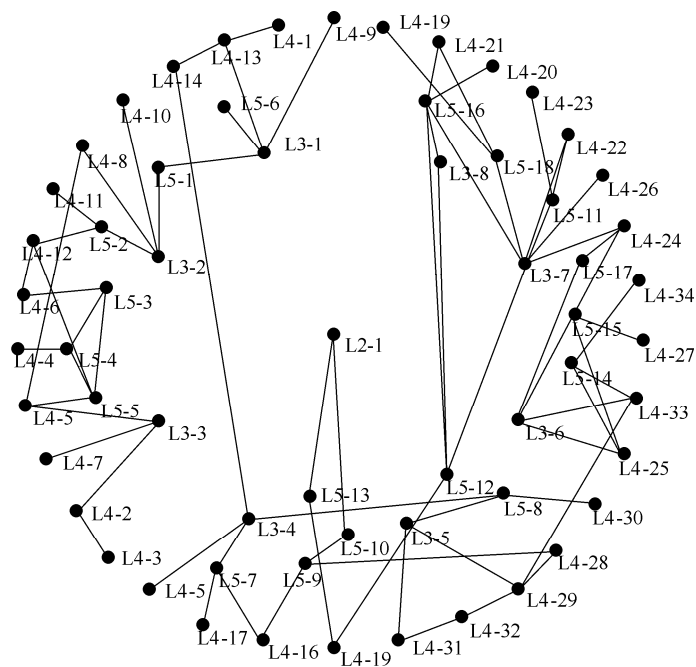


图 4.4 映射网络

为了计算抗毁性测度指标，假设一项器材保障任务：由资源点 L3-4 派送一辆车，向需求点 L4-4 运输 1000 个单位器材，按照最短路径算法，初始最优供应路线为 L3-4→L5-7→L5-6→L3-1→L5-1→L3-2→L4-8→L4-5→L5-5→L5-4→L4-4。

4.3.2 攻击策略

1. 随机攻击策略

信息对称泛指博弈双方掌握的信息的无差异性。信息对称的概念在许多领域有着广泛应用，例如，经济学中关于市场经济环境下买卖双方将信息对称作为公平交易的前提之一，军事领域中作战双方关于对方军事信息的掌握程度对作战决策有重要指导作用等。随着我军信息化进程的加快，我军对战场信息的掌控能力不断加强，与世界军事发达国家之间的信息不对称差距逐渐减小，装备器材保障网络在未来战争中可能面临信息对称条件下的敌方火力攻击。随机失效、随机故障、随机攻击等概念泛指目标系统的部件以同等的概率面临失效的可能，因此，借用随机失效的概念来描述信息对称条件下装备器材保障网络的失效模式。

定义 4.7 装备器材保障网络随机失效 装备器材保障网络中的节点按照一定的概率分布产生节点的随机失效，称为装备器材保障网络随机失效。

在算法中，网络中的某个节点失效，表现为断开与该节点有关的所有连接，失效

节点成为一个孤立的节点，从而失效节点与其他节点的距离为无限大。

在本节的实验中，将模拟不同的攻击强度，即随机选择总节点数的 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%数量的节点实施攻击，然后分析不同攻击强度下相应的抗毁性测度的变化。为了减小实验误差，对每次攻击仿真 10 次，取相应抗毁性测度的平均值作为最终结果。

2. 蓄意攻击策略

与信息对称相反，信息不对称理论反映了博弈双方对信息掌握的差异性，这种差异性可能会对决策产生重大影响。从古至今，信息在战争中的重要作用都是毋庸置疑的，基于信息系统的体系作战能力更是体现了未来战争将是基于信息的信息化战争。因此，装备器材保障网络在未来战争中将不可避免地面临信息不对称下的攻击，针对信息不对称攻击下的保障网络抗毁性表现，研究对应的优化策略具有明显的军事意义。网络的蓄意攻击是指按照一定的攻击策略对网络实施攻击，攻击的形式是移除网络中的节点或边，借用网络的蓄意攻击来描述信息不对称攻击下装备器材保障网络的失效模式。

定义 4.8 装备器材保障网络蓄意攻击 按照一定的策略移除网络中的节点，这个过程称为装备器材保障网络的蓄意攻击过程。

在介绍蓄意攻击策略之前，首先引入节点介数的概念。节点介数是网络（特别是复杂网络）的基本参数，Freeman 在 1977 年首次提出了介数的概念^[144]，用于反映节点或边的重要程度。

定义 4.9 网络节点介数 网络节点介数定义为在网络中所有的最短路径之中，经过该节点的数量占有所有最短路径总数的比例，即

$$B_i = \sum_{j,k \in N} \frac{n_{jk(i)}}{n_{jk}}$$

式中， n_{jk} 表示节点 j 、 k 之间的最短路径数量， $n_{jk(i)}$ 表示节点 j 、 k 之间的最短路径中经过节点 i 的数量。由节点介数的定义可知，它反映了节点在整个网络中的作用和影响力，是网络的基本参数之一。

在对网络的攻击策略研究中，许多文献都采用了基于节点介数的攻击策略^[144~146,48]，众多研究结论也表明，基于节点介数的攻击策略能够很好地模拟网络蓄意攻击。基于节点介数的攻击策略有两种。

(1) IB 攻击，即初始介数（Initial Betweenness, IB）攻击，按照初始网络中节点介数的大小顺序移除节点。

(2) RB 攻击,即当前最大介数 (Recalculated Betweenness, RB) 攻击,每次移除当前网络中节点介数最大的节点。

为了体现攻击的动态性,本书拟选择 RB 攻击策略。在具体实施时,将当前网络中的所有节点按介数大小从高到低排序,分别选取前 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%数量的节点实施攻击,为了减小实验误差,对每次攻击仿真 10 次,取相应抗毁性测度的平均值作为最终结果。

4.3.3 网络抗毁性仿真实验

1. 网络鲁棒性

图 4.5 所示为网络在随机攻击策略和蓄意攻击策略下的网络鲁棒性变化曲线,其中, x 轴表示被攻击的节点数量占节点总数量的比例, y 轴表示的是网络的鲁棒性,图中的每个数据点都是取 10 次模拟攻击后计算的网络鲁棒性的平均值。

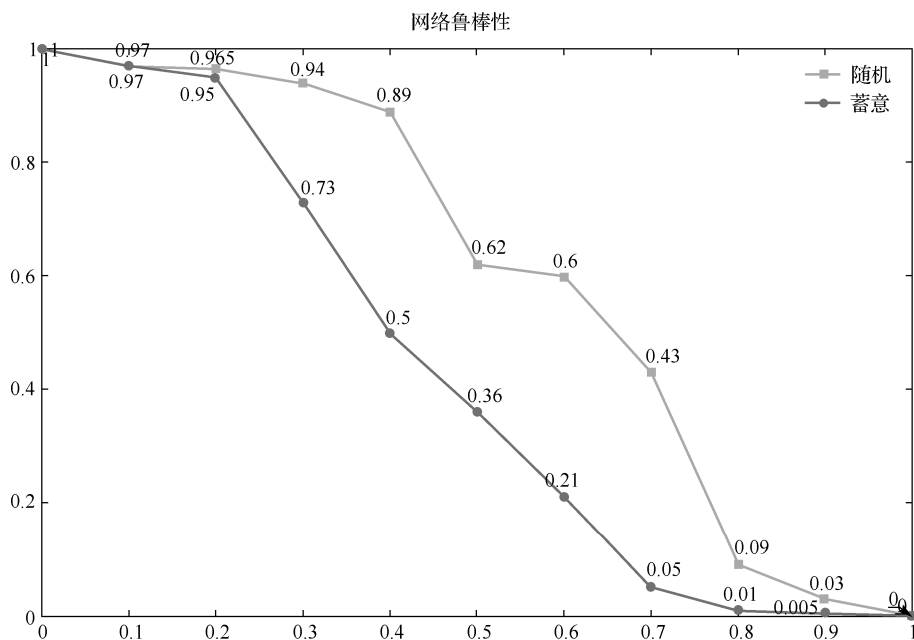


图 4.5 网络鲁棒性变化曲线

从图 4.5 中可以看出,网络的鲁棒性都随着攻击强度的增大而减小,其中,蓄意攻击策略下网络鲁棒性减小得更快,说明蓄意攻击对网络鲁棒性的影响比随机攻击的大。在攻击强度(用被攻击的节点数量占节点总数量的比例来表示攻击强度)小于 0.2 时,网络的鲁棒性都能保持在 0.95 以上,表明了本书所构建的网络在面对小规模攻击失效时具有较强的抗毁性,而攻击强度一旦超过 0.2,两种攻击策略就都会使得网络

鲁棒性急剧减小,称 0.2 为网络鲁棒性的“下降临界点”。随机攻击策略下,当攻击强度达到 0.9 时,网络几乎崩溃,在蓄意攻击策略下,使网络崩溃的攻击强度值是 0.8,称 0.8 为网络鲁棒性的“崩溃临界点”。

从以上分析可以看出,蓄意攻击比随机攻击更能使网络快速崩溃,究其原因,在蓄意攻击策略下,每次攻击的都是网络中最为重要的节点,导致网络快速崩溃。因此,在安排防御资源时,应当加强对介数较大的节点的防御。

2. 网络效率

图 4.6 所示为随机攻击策略和蓄意攻击策略下的网络效率变化曲线,其中, x 轴代表被攻击节点数量占节点总数量的比例, y 轴代表网络效率,图中的每个数据点都是取 10 次模拟攻击后计算的网络效率的平均值。

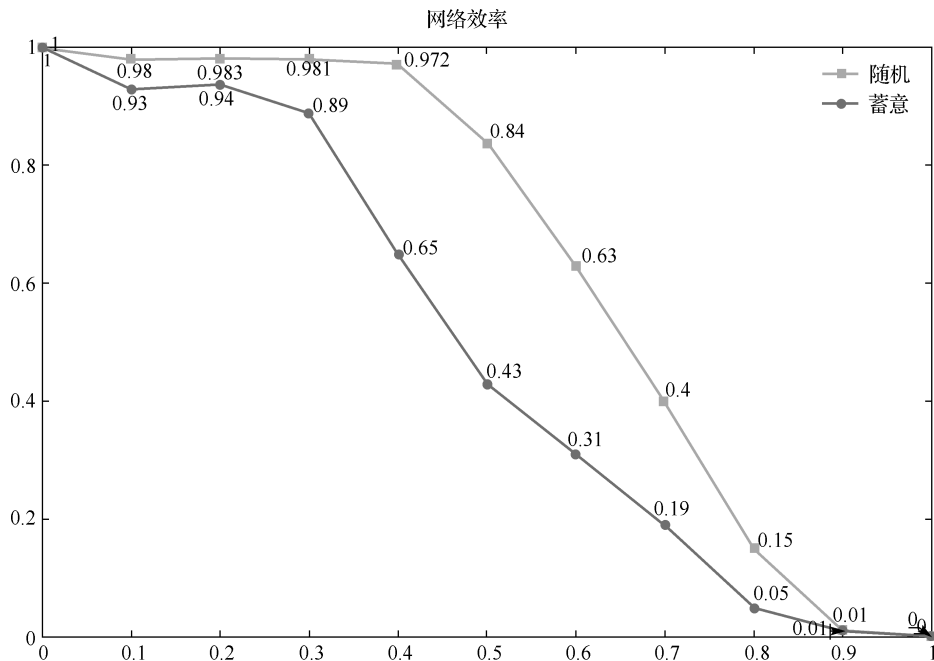


图 4.6 网络效率变化曲线

从图 4.6 中可以看出,随着攻击强度的增大,网络效率曲线呈下降趋势,蓄意攻击策略下网络效率的下降速度比随机攻击策略下的下降速度更快,表明蓄意攻击对网络效率的影响更大。随机攻击策略下的下降临界点出现在攻击强度为 0.4 时,蓄意攻击策略下的下降临界点出现在攻击强度为 0.3 时,比随机攻击策略下的下降临界点略小,两种攻击模式下的崩溃临界点都出现在攻击强度为 0.9 时。通过图 4.6 可发现,在随机攻击策略下,下降临界点出现之前,网络效率几乎不受外界中断的影响,当攻

击强度达到 0.5 时, 网络效率仍然能够维持在 0.8 以上, 这说明本书所构建的网络对随机攻击表现出较好的抗毁性, 而对蓄意攻击, 网络的抗毁性则相对较差。

3. 器材到达率

图 4.7 所示为网络在随机攻击策略和蓄意攻击策略下的器材到达率变化曲线, 其中, x 轴代表被攻击节点数量占节点总数量的比例, y 轴代表器材到达率, 图中的每个数据点都是取 10 次模拟攻击后计算的器材到达率的平均值。

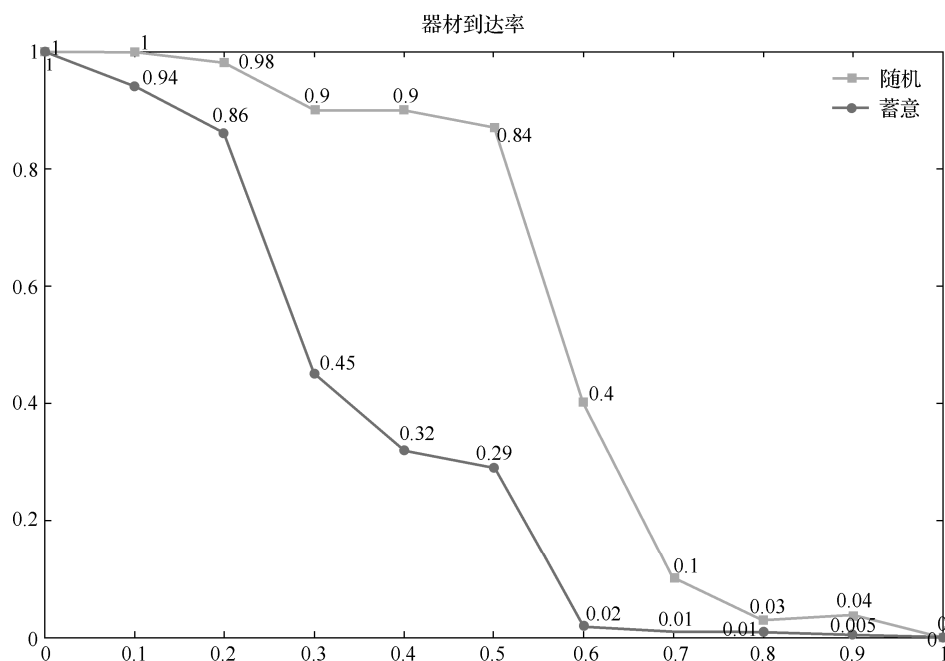


图 4.7 器材到达率变化曲线

从图 4.7 中可以看出, 器材到达率在整体上也是随着攻击强度的增大而不断减小的, 其中, 蓄意攻击策略下器材到达率的下降速度更快, 说明蓄意攻击对器材保障率的影响更大。在蓄意攻击策略下, 下降临界点很早就出现了 (0.2), 而在随机攻击策略下, 下降临界点在 0.5 时才出现, 在蓄意攻击策略下崩溃临界点 (0.6) 也很早就出现了, 这进一步说明网络业务层非常容易受外界中断的影响, 在实际的保障业务中, 必须建立相应的优化策略和应急预案, 保证器材保障任务的顺利完成。相比而言, 随机攻击策略下的下降临界点 (0.5) 出现得较晚, 且此时的器材到达率仍然能够维持在 0.8 以上, 崩溃临界点 (0.8) 也出现得较晚, 这说明网络对于随机攻击表现出较好的抗毁性。

4. 用户等待时间

图 4.8 所示为网络在随机攻击策略和蓄意攻击策略下的用户等待时间变化曲线，其中， x 轴代表被攻击节点数量占节点总数量的比例， y 轴代表用户等待时间，单位为分钟，图中的每个数据点都是取 10 次模拟攻击后计算的用户等待时间的平均值。实验中，取平均用户最大等待时间为 120 个单位时间。另外，在网络节点被全部中断（攻击强度为 1）时，网络处于完全崩溃状态，此时的用户等待时间理论上应为无穷大，考虑程序实现的可行性，在程序实现时取 1000 个单位时间作为无穷大值。

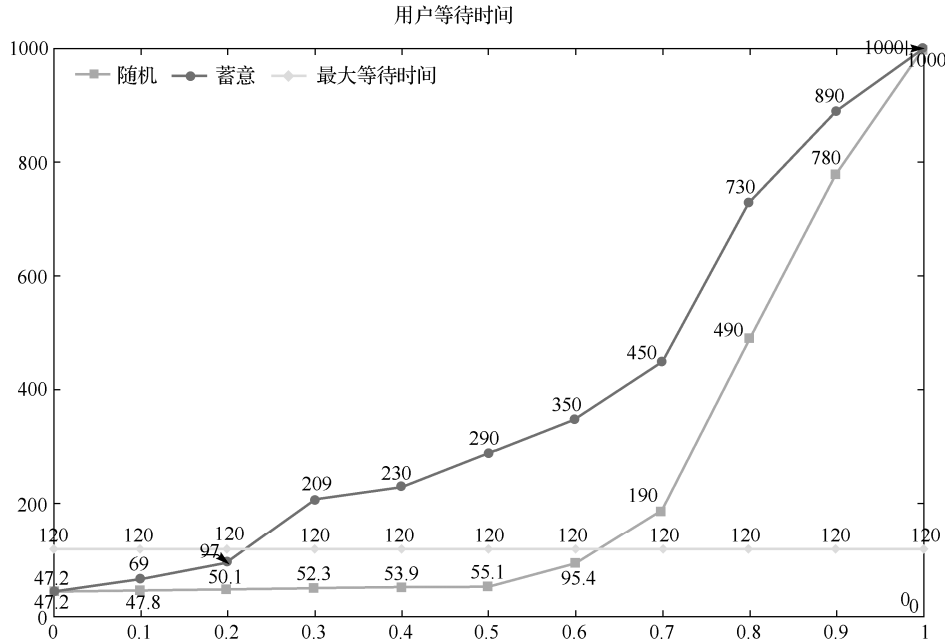


图 4.8 用户等待时间变化曲线

从图 4.8 中可以看出，用户等待时间整体上随着攻击强度的不断增大而增大，这是因为网络节点的中断数量直接影响车辆路径的选择和行驶时间。在随机攻击策略下，当攻击强度达到 0.7 时，用户等待时间才超过用户最大等待时间；在蓄意攻击策略下，当攻击强度为 0.3 时，用户等待时间就超过了用户最大等待时间。两个攻击强度数值相差较大，这说明外界中断对网络的用户等待时间（或用户满意度）有较大影响。另外还注意到，在随机攻击策略下，用户等待时间在攻击强度为 0.5 之前几乎没有多大变化，这说明网络对于随机攻击具有很好的抗毁性，之所以出现这种情况是因为随机攻击具有“盲目性”，虽然有众多节点遭到攻击，但是没有对车辆的行驶路线造成太大的影响。

4.3.4 装备器材保障网络抗毁性结论

针对未来信息化条件下装备器材保障网络可能面临的信息对称和信息不对称的战场环境,前面分别构建了随机攻击策略和蓄意攻击策略,在两种攻击策略下对装备器材保障网络进行了抗毁性实验,分析了网络拓扑层和保障业务层抗毁性指标的变化情况。在抗毁性实验结果分析的基础上,可以总结出本书所构建的装备器材保障网络抗毁性的基本结论。

(1) 装备器材保障网络拓扑层具有较好的抗毁性,特别是在面临随机攻击时,其抗毁性较令人满意。

关于这一结论,通过综合对比实验中网络遭受攻击后各项抗毁性指标的变化情况就能很容易得出。从图 4.5、图 4.6 可以看出,在随机攻击策略下,导致拓扑层抗毁性指标快速下降的攻击强度基本在 0.4~0.7 范围内,也就是说当网络中 40% 的节点遭到随机攻击时,拓扑层抗毁性开始大幅度下降,当 70% 的节点遭到攻击时,网络崩溃。王文峰等人^[104]对装备器材保障网络的抗毁性进行了研究,得出的结论是当网络中大概 25% 的节点遭到攻击时,网络连通性开始大幅度下降。因此,对比王文峰等人的研究结论,本书所构建的装备器材保障网络拓扑层具有较好的抗毁性。

(2) 装备器材保障网络业务层的抗毁性较差,特别是在面临蓄意攻击时,网络中的保障业务非常容易受到影响。

综合对比图 4.7 和图 4.8 可以看出,网络中即使少量节点遭到蓄意攻击(如图 4.7 中攻击强度为 0~0.2)时,网络的业务层抗毁性指标也出现明显的下降,相比而言,随机攻击则对业务层抗毁性指标的影响较小。在对器材到达率和用户等待时间的抗毁性实验中,也可以看出使业务层抗毁性指标出现明显下降的攻击强度值出现得很早(两个实验中都是 0.2),使网络接近崩溃的攻击强度值也出现得较早(0.3 和 0.6)。由此可以得出结论,装备器材保障网络业务层非常容易受到外界中断的影响,因此,有必要通过优化策略来避免外界因素对保障业务的干扰,提高保障网络的抗毁性。

4.4 本章小结

网络的抗毁性需要具体的指标来度量,为度量所构建的装备器材保障网络的抗毁性,本章针对度量方法进行了深入研究。针对装备器材保障网络的层次性特点,在构建抗毁性测度指标时,分别从物理层和业务层构建抗毁性指标。针对装备器材保障网络在未来可能遭遇的战场环境,设计了随机攻击和蓄意攻击两种攻击策略,并在两种

攻击策略下对网络的抗毁性进行了实验,对各项抗毁性指标进行了数值分析,得出了关于装备器材保障网络抗毁性的基本结论。

研究保障网络抗毁性,特别是定量研究其抗毁性的文献不多。本章研究的装备器材保障网络抗毁性度量方法,丰富了抗毁性理论在军事保障网络抗毁性研究中的应用,为装备器材保障网络抗毁性度量提供了有效的方法支撑,为更高级别的军事保障网络抗毁性定量评估提供了可供借鉴的思路。

第 5 章 装备器材保障网络抗毁性优化

通过第 4 章的研究可知，不论是随机攻击还是蓄意攻击，网络的物理层和业务层都会受到不同程度的影响，这种影响最终都会反映在对保障业务的干扰上。另外，装备器材保障网络是一个业务网络，网络存在的价值在于为器材保障业务服务，因此，当网络受到外界中断干扰时，普遍关心的是保障业务会不会受到影响，如果受到影响，怎样将影响降到最小。本章将针对保障网络受到外界中断干扰时如何将干扰产生的影响降到最小这一问题展开深入研究。本章的研究内容将有助于提高保障网络在外界中断干扰情况下的抗毁性，因此，本章所研究的问题属于保障网络抗毁性优化的研究范畴。

本章内容安排如下：首先对保障网络业务层中断需求进行分析，提出业务层中断恢复策略及确定原则；接着构建多目标中断恢复模型，模型的目标函数是追加时间最小、追加距离最短、路径危险度最小、追加费用最少；针对多目标规划模型求解的复杂性，设计基于 NSGA-II 的模型求解算法；最后通过一个算例来检验本章的研究成果。

5.1 业务层中断恢复问题分析

5.1.1 救援策略的概念

本章的研究目的是当网络发生中断且影响到保障业务时，指挥决策部门通过实施一定的救援策略，尽可能地消除中断对保障业务带来的负面影响，最大限度地将器材物资运送到需求点。为此，首先引入几种救援策略。在金丽亚^[105]研究的基础上，本书定义 4 种救援策略：自我救援策略、顺路救援策略、邻近救援策略、增派救援策略。

（1）自我救援策略

自我救援是指在运输车辆没有受到干扰（如道路被中断，但是运送器材的车辆没有损伤）或受到干扰但是尚有自救能力的情况下，通过一定的自救措施（如重新选择运输路径、在短时间内完成道路的抢修铺设、运输车辆受到攻击时在短时间内进行修复等）确保任务完成的救援过程。考虑本书的研究内容，这里的自我救援只考虑车辆未受到干扰时重新选择路径的救援方式。自我救援策略如图 5.1 所示。

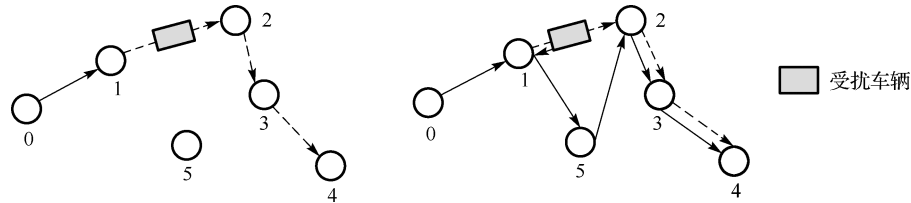


图 5.1 自我救援策略

(2) 顺路救援策略

顺路救援是指运输车辆 B 按照既定线路要经过运输车辆 A 发生中断的地点, B 对 A 实施救援的救援策略。顺路救援策略如图 5.2 所示。

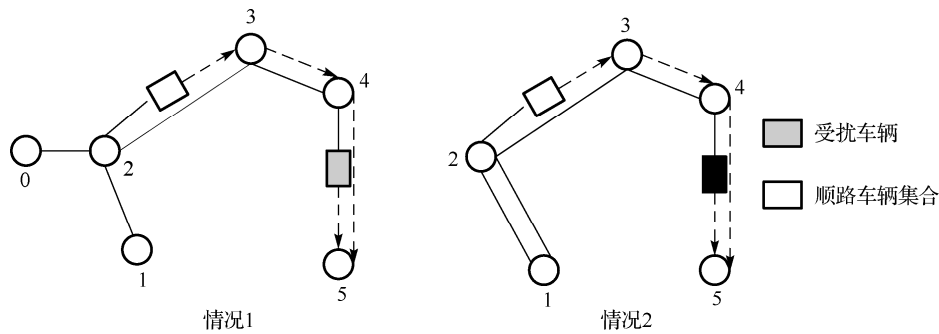


图 5.2 顺路救援策略

(3) 邻近救援策略

邻近救援是指通过中断地点附近的其他运输车辆对中断任务实施救援的一种救援策略。邻近救援策略如图 5.3 所示。

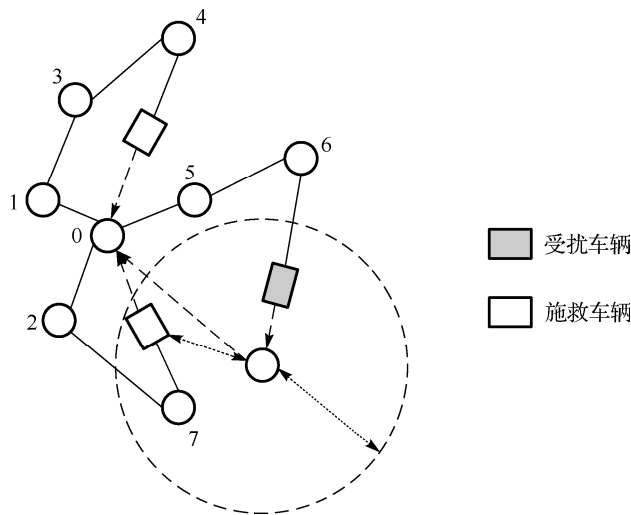


图 5.3 邻近救援策略

(4) 增派救援策略

增派救援是指从资源点重新分配器材物资，安排配送力量进行器材物资配送的过程。增派救援策略如图 5.4 所示。

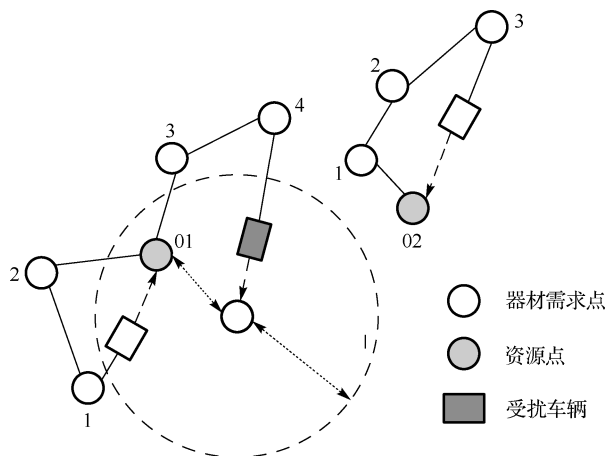


图 5.4 增派救援策略

很明显，顺路救援策略、邻近救援策略和增派救援策略都属于他救策略，是在不具备自我救援时所采取的应急救援措施，它们对整个保障任务的扰动都比自我救援策略产生的扰动大，因此，如果具备自我救援条件，自我救援策略是首选的救援策略。

根据以上分析，本书将网络业务层恢复策略定义为：根据对原保障方案扰动最小的原则，采用上述 4 种策略的一种或几种，使被中断业务尽可能恢复。

5.1.2 业务层中断问题描述

在实际保障业务中，为了充分利用车辆的装载空间，一辆车可以为多个需求点提供器材物资运输服务，一个资源点可以派出多辆运输车辆，这一点在战时条件下体现得更为明显。在实际战场环境中，不仅只有网络节点可能遭到敌人攻击，网络中的边（道路）、运送器材物资的车辆均有可能遭到攻击。因此，为了使研究内容更加贴近实际，本章中对前面构建的网络进行扩展：一个资源点可以同时向多个需求点配送器材物资，同时考虑网络节点、边和运载工具均可能受到攻击，在此基础上，分析当网络业务层中断发生时如何选择合适的救援策略，使得中断对网络中保障业务的影响最小。

这里采用本书中的定义，将各级保障中心视为资源点，将部队各级修理机构及器

材仓库视为需求点。假设网络中的各资源点可提供火车、汽车、飞机等 K 种运输方式, 每种运输方式的容量为 Q_k ($k=1,2,\dots,K$)。初始时刻, 根据网络中的资源分布、各资源点运力情况、器材需求点分布情况、时间窗、运输费用等约束条件, 决策部门生成初始供应方案, 相关资源点按照初始供应方案设定任务序列, 对多个需求点实施器材供应。这里假设运量在节点之间未被分割, 每两个连通节点之间存在一种综合评价价值最高的运输方式, 认为该综合评价价值最高的运输方式是这两个节点间的唯一运输方式, 不同运输方式之间通过中转进行联合运输, 器材在配送过程中会产生运输费用、中转费用。另外, 本书不考虑器材的品种问题, 即认为所有运输方式都运送同一种器材。这样, 就构成了一个多式联运网络, 网络中的资源点通过多种运输方式对多个需求点提供服务。

从图论角度, 将业务层中断问题定义在一张完全赋权图 $G(V,E,K)$ 上。 $V=\{v_1,v_2,v_3,\dots,v_m,v_{m+1},\dots,v_{m+n}\}$ 代表多式联运网络中所有顶点的集合; $E=\{(v_i,v_j):v_i,v_j\in V, i\neq j\}$ 代表多式联运网络中各运输方式路段的集合, 也就是网络中所有连通边的集合; K 为多式联运网络中运输方式的集合。顶点 $v_1\sim v_m$ 为 m 个资源点, $v_{m+1}\sim v_{m+n}$ 为 n 个器材需求点, 第 i 个需求点对器材的需求量为 d_i ($i=1,2,3,\dots,n$), $\max(d_i)\leq Q$, 需求点 i 的最大用户等待时间为 T_i , 表示器材必须在 T_i 时间内运送到需求点 i , 超出 T_i 时间将会影响用户满意度, 通过相应的惩罚因子实现。网络中每个顶点 $v_i\in V$ 都关联几个非负的权值, 即需求量 **demand**, 供应时间 T_i , 单位器材采用运输方式 k 的卸载时间 t_{ii}^k 、卸载费用 r_{ii}^k 、装载时间 t_{2i}^k 、装载费用 r_{2i}^k 和危险性系数 e_i 。对于资源点来说, $\forall v_i\in\{v_1,v_2,\dots,v_m\}$, **demand** $_i=T_i=t_{ii}^k=r_{ii}^k=0$, t_{2i}^k 和 r_{2i}^k 定义了起始资源点的装载时间和装载费用; 对于需求点来说, $t_{2i}^k=r_{2i}^k=0$, t_{ii}^k 和 r_{ii}^k 定义了末端需求点的卸载时间和卸载费用。每条弧 (v_i,v_j) 也都关联几个非负的权值, 包括弧的长度 (距离) d_{ij} 、路径危险性系数 e_{ij} 、道路类型 (铁路、公路等) b_{ij}^k 及单位运输费用 c_{ij}^k 。

基于以上假设, 本章的业务层中断问题可以描述为: 在装备器材供应过程中, 假设车辆 k_0 在 T_0 时刻受到了中断 (可能是运输道路损坏、运输工具损坏或运输线路上的网络节点遭到攻击), 设在 T_0 时刻, 施救车辆 k_1 所在的位置为 (x_{kd}, y_{kd}) , k_1 尚未完成的任务为集合 $N_n(k)$, 按照初始供应方案, 车辆 k_1 在完成所有原定任务后剩余的空间资源为 Cl_k , 按照初始供应方案, 车辆 k_1 在完成其任务序列后剩余的时间资源为 Tl_k , 受扰车辆 k_0 在 T_0 时刻所在的位置为 (x_d, y_d) , 网络中尚未完成的任务序列集合为 R , 要求选择一个合理的救援策略 (自我救援策略、顺路救援策略、邻近救援策略、增派救援策略) 集合, 使中断任务序列按照该救援策略实施对原保障方案所造成的扰动最小, 尽量确保所有需求点能够在最大用户等待时间内获得器材。

5.1.3 业务层中断恢复策略确定原则

自我救援策略、顺路救援策略、邻近救援策略和增派救援策略基于不同的出发点，有各自的适用范围，各有优势和劣势，如表 5.1 所示。自我救援策略是在车辆本身没有受到损伤的前提下通过重新选择路径继续完成运输任务，新的运输路线可能会导致追加时间成本和追加费用成本，但与其他三类救援策略相比，产生的追加成本最小，对系统的扰动也最小，因此是首选的救援策略；其次是顺路救援策略，该策略会产生一定的装卸载费用和装卸载时间成本，只会影响顺路救援车辆的后续任务序列（因为施救车辆还要负责向受扰车辆先前负责的需求点运送器材），对系统的扰动不大，也是一种较好的救援策略；邻近救援策略虽然不需要增派车辆，但对需求点的用户等待时间产生较大影响，从而影响用户满意度；增派救援策略虽然对资源点中的运输车辆数量有较高要求，追加成本也较高，但能处理各种情况下的服务中断事件，灵活性最大。

表 5.1 救援策略分析

救援策略	实施前提	优势	劣势
自我救援策略	车辆没有受损，具备继续运输的条件	追加成本较小，对系统的扰动小	无
顺路救援策略	中断发生时，施救车辆恰好经过任务区域	追加成本较小，对系统的扰动小	影响施救车辆的任务序列
邻近救援策略	中断发生时中断点附近有在途车辆	不需要增派车辆，避免产生新的追加成本	延长用户等待时间，需求点满意度下降
增派救援策略	资源点有足够的剩余车辆	不影响网络中其他车辆的任务	产生较多的额外附加成本

由于军事保障任务对时间要求具有特殊性，救援的过程中在运输线路安全的情况下，选择救援策略的评价标准主要是产生的追加时间成本。从定性的角度分析，自我救援策略是首选策略，原因是这种策略对系统的扰动小，产生的追加时间成本仅次于初始供应方案；其次是顺路救援策略，原因是这种策略产生的追加时间成本也不大，对系统的扰动也较小，只会影响救援车辆的后续任务序列；最后选的是增派救援策略，原因是这种策略所产生的一次性追加时间成本最大，车辆的运输时间很可能超出用户等待时间。但是在装备器材供应任务中断处理的过程中，情况远比定性分析的结果复杂得多，在实际决策过程中，应当根据实际情况灵活组合运用多种救援策略，力求减小中断对系统的扰动影响。

另外, 在实施增派救援策略时, 考虑所有的资源点是没有意义的, 应当尽量从中断地点附近协调资源点。因此, 为了尽快处理中断事件, 有必要划分装备器材资源点的范围, 而这个范围并不是简单的距离的概念, 而是根据装备器材保障模式下的保障原则(如建制保障、调剂保障、越级保障)及决策机构的管辖范围, 从全局的高度科学、合理地确定的一个范围。为了快速地确定这个范围, 根据第2章保障模式中对保障业务的处理原则, 本书对资源点的级别进行了界定。

第1级资源点——中断点附近的本区域资源点, 包括区域保障中心和群点保障中心;

第2级资源点——本区域保障中心;

第3级资源点——非本区域的区域保障中心和群点保障中心;

第4级资源点——全军保障中心。

在处理中断事件时, 按照资源点级别由低到高(第1级到第4级)的原则确定由哪一级实施增派救援, 本书用符号 θ 代表资源点级别。

5.1.4 业务层中断施救决策过程

当中断发生时, 首先判断车辆是否具备实施自我救援的条件。若具备, 则优先采取自我救援策略, 以受扰车辆当前位置作为出发点, 剩余未保障的需求点作为目标节点, 重新规划行驶路线。若不具备自我救援的条件, 则考虑是否有顺路的车辆, 若有, 并且顺路车辆的剩余装载空间达到要求, 则考虑使用顺路救援策略。若顺路救援策略不可行, 则考虑邻近救援策略是否可行, 若邻近救援策略可行, 则使用邻近救援策略。若自我救援策略、顺路救援策略、邻近救援策略均不可行, 则使用混合救援策略或增派救援策略。

另外, 在决策过程中, 考虑运输时间和车辆装载空间的限制, 在自我救援条件不具备、顺路救援和邻近救援均由于剩余空间限制而不能实施的情况下, 若顺路车辆和邻近车辆的总空间达到要求, 则可以使用顺路救援、邻近救援的联合救援策略。在特殊情况下, 如当中断车辆所负载的器材量特别大, 而顺路车辆和邻近车辆空间不足, 受中断影响的这批器材又紧急需要时, 可以考虑综合使用顺路救援、邻近救援和增派救援的联合救援策略, 一方面, 使用顺路救援和邻近救援可以先将部分器材运达需求点, 另一方面, 使用增派救援可以确保将剩余的器材运达需求点。

中断施救决策过程如图5.5所示。

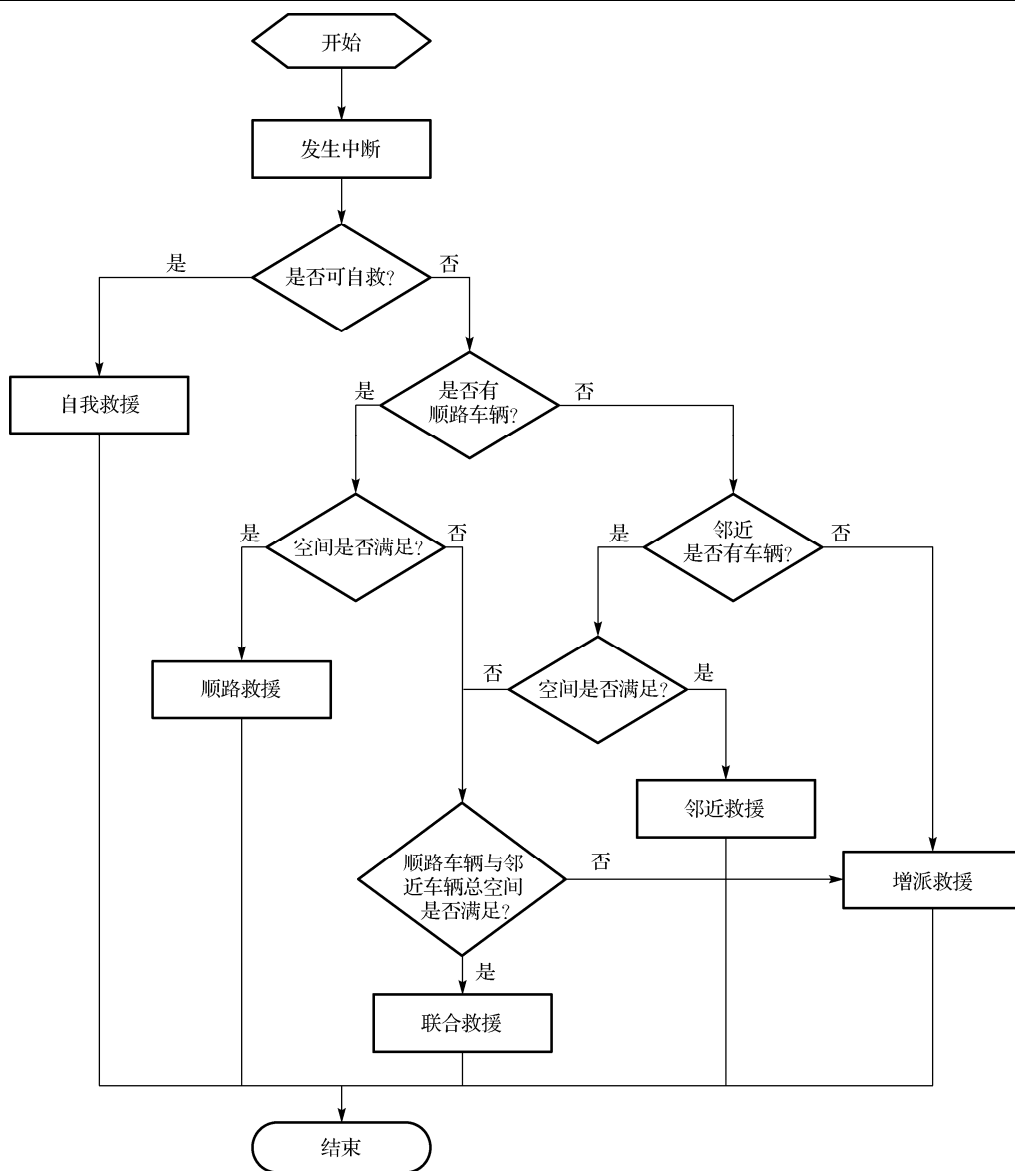


图 5.5 中断施救决策过程

5.2 业务层中断恢复模型构建

5.2.1 目标函数分析

1. 目标函数构成

在前面的分析中提到，中断恢复策略的确定主要以对原保障方案造成的扰动最小

作为决策目标。为了对扰动进行具体的数值度量,选择时间、路径、安全性和总费用 4 个方面作为模型的目标函数,它们分别从不同的方面影响器材到达率和用户等待时间两项抗毁性指标,如图 5.6 所示。下面分别分析 4 种扰动的构成及度量表达式。

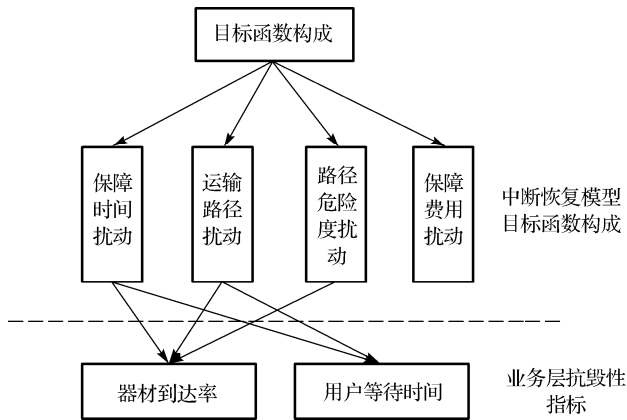


图 5.6 目标函数构成

2. 保障时间扰动

从器材需求点的角度看,中断发生后,已经接受服务的需求点不会受到影响,而尚未接受服务的需求点的供应时间则可能受到影响,受影响的需求点包含两类:一类是受扰车辆尚未服务的需求点;另一类是参与救援的车辆尚未服务的需求点。中断可能造成新方案的供应时间比初始供应时间提前或延后。设中断后所有未接受服务的需求点集合为 D' ,将中断发生时刻各正常运送器材的车辆所在的位置视为一类特殊的器材资源点(虚拟资源点),中断发生后所有虚拟资源点和实际资源点的集合为 R ,设从资源点 m 出发的车辆 k 对器材需求点 i 产生的供应时间偏离(延后或提前)为 $|t_i^{km}|$, $a(\theta)_i^{km}=1$ 表示从资源点 m 出发的车辆 k 对需求点 i 供应器材(否则, $a(\theta)_i^{km}=0$),则在 θ 级资源点范围内总的保障时间偏离为

$$f_1 = \sum_{k \in V'_m} \sum_{m \in D'} \sum_{i \in R} a(\theta)_i^{km} \cdot |t_i^{km}| \quad (5.1)$$

3. 运输路径扰动

当保障网络中发生中断事件时,无论采取何种救援策略,相对于初始供应路线都会造成路线不同程度的偏离(扰动)。在中断前,各车辆的路径是最优的,而救援策略所产生的新路径集合是在最优路径集合上产生的一个偏离,从而新路线的偏离对于整个保障网络的影响还是显而易见的,整个供应计划的可实施性也出现了一定的下降。针对这一问题,相对于原供应计划,调整计划需要尽可能小的路径偏离才能满足整个

保障网络的要求。设 $R(P)$ 为初始供应路线集合, $R(\bar{P})$ 为中断后的供应路线集合, 相对于初始供应方案, 新增的路径 (i, j, k, m) 可表示为 $R(\bar{P}) / R(P)$, 定义 $t(\theta)_{i,j}^{km} = 1$; 减少的路径 (i, j, k, m) 可表示为 $R(P) / R(\bar{P})$, 定义 $t(\theta)_{i,j}^{km} = -1$; 未发生变化的路径 (i, j, k, m) 可表示为 $R(\bar{P}) \cap R(P)$, 定义 $t(\theta)_{i,j}^{km} = 0$ 。定义 $d(\theta)_{i,j}^k$ 表示车辆 k 从节点 i 到节点 j 的距离, 则在 θ 级资源点范围内运输路径的偏离的总里程为

$$f_2 = \sum_{k \in V'_m} \sum_{m \in D'} \sum_{i \in R} \sum_{j \in R'} |t(\theta)_{i,j}^{km} \cdot d(\theta)_{i,j}^k| \quad (5.2)$$

4. 路径危险度扰动

新救援方案与原方案相比, 新增了部分路径和节点, 这部分路径和节点会导致新的危险度。同时, 原方案的部分路径和节点也不在新方案中, 这部分路径和节点导致危险度的减小。因此, 新方案的危险度扰动是这两部分的整体反映。设在 θ 级资源点范围内, 节点 i 的安全性系数为 $e(\theta)_i$, 从资源点 m 出发的车辆 k 由节点 i 到节点 j 的安全性系数为 $f(\theta)_{i,j}^k$, 受扰需求点、虚拟资源点和所有 θ 级资源点的并集为 R^* , 则在 θ 级资源点范围内路径的危险度扰动可表示为

$$f_3 = \sum_{k, l \in V'_m} \sum_{m \in D'} \sum_{i \in R} \sum_{j \in R'} |f(\theta)_{i,j}^k + e(\theta)_i t(\theta)_{i,j}^{km}| \quad (5.3)$$

5. 保障费用扰动

新救援方案产生的费用主要包括车辆运输的固定费用、在节点转换运输方式时产生的中转费用和运输车辆在供应路线上的运输费用。设车辆 k 的固定费用为 c_0^k , 单位器材在节点 i 从第 u 种运输方式转换为第 l 种运输方式的单位器材中转费用为 $r(\theta)_i^{ul}$, 车辆 k 运输单位器材每千米所需的费用为 c_k , 中断发生后救援车辆 k 从受扰车辆上取的器材量为 P_k^* , 则在 θ 级资源点范围内保障费用扰动可表示为

$$f_4 = \sum_{k \in V'_m} c_0^k + \sum_{u, l \in V'_m} \sum_{m \in D'} \sum_{i \in R} \sum_{j \in R'} [d(\theta)_{i,j}^k c_k + r(\theta)_i^{ul}] P_k^* t(\theta)_{i,j}^{km} \quad (5.4)$$

5.2.2 模型假设及变量定义

模型的目标是生成对保障网络影响最小的调整方案, 即尽可能准时供应需求点所需的器材、中断处理后新供应方案与初始供应方案路径的偏离最小、器材供应过程中尽量减小路径危险度、中断处理后新供应方案与初始供应方案总费用的偏离最小。模型主要假设如下:

(1) 已知器材需求点的分布和每个需求点的需求量, 一个资源点可以通过多种运输方式为多个需求点提供服务, 而且救援所需的车辆都能满足;

(2) 任何时刻任何车辆的位置、状况等信息都可被指挥中心及时得到;

(3) 当运输车辆受到中断时, 可能对运输器材造成部分损坏, 从而导致需求点不能获得全部所需器材;

(4) 车辆的装载能力有限;

(5) 时间窗类型为软时间窗, 即在时间窗内将器材送到需求点, 满意度为 100%, 若超出时间窗送达, 则需要施加惩罚因子;

(6) 初始方案中, 一个需求点最多由一辆车负责为其服务, 中断发生后, 由于采用联合救援策略, 可以由多辆车为其提供器材服务;

(7) 只考虑网络遭到单次攻击的情况, 不考虑网络遭到连续攻击的情况;

(8) 保障车辆完成任务后需要回到出发的资源点;

(9) 受中断影响的车辆不参与救援。

定义如下参数和变量。

α_k : 增派车辆 k 的惩罚因子;

β : 不能服务需求点的惩罚因子;

γ : 新增行驶路径的惩罚因子;

δ : 新增路径危险度的惩罚因子;

T : 中断发生时, 按照初始供应方案受扰车辆未完成的需求点集合;

$N_n(k)$: 中断发生时, 施救车辆 k 尚未完成的需求点集合;

$D = (x_d, y_d)$: 中断发生时受扰车辆所在位置;

$R = T \cup N_n(k) \cup D$: 受扰需求点集合, 包括受扰车辆所在位置的虚拟需求点;

$R^* = T \cup D \cup S(\theta)$: 受扰需求点、虚拟资源点和所有 θ 级资源点的并集;

$D' = D \cup T$: 虚拟需求点和受扰车辆未完成的需求点的并集;

V'_m : 中断发生后正常运行的车辆与增派车辆的并集;

(x_{kd}, y_{kd}) : 中断发生时施救车辆 k 所在位置;

$R(P)$: 初始供应路线集合;

$R(\bar{P})$: 中断后的供应路线集合;

Q_D : 中断发生时受扰车辆装载的器材量;

P_k : 中断发生时救援车辆 k 装载的器材量;

P_k^* : 中断发生后救援车辆 k 从受扰车辆上获取的器材量;

S_{nk} : 中断发生前车辆 k 对需求点 n 的服务时间 (装卸载时间);

S'_{nk} : 中断处理后车辆 k 对需求点 n 的服务时间 (装卸载时间);

Q_k : 车辆 k 的载重空间;

c_0^k : 增派车辆 k 的固定费用;

k_0 : 受扰车辆;

$|t_i^{km}|$: 从资源点 m 出发的车辆 k 对需求点 i 产生的供应时间偏离;

$[ET_n, LT_n]$: 任务 n 的时间窗。

以下符号中的 θ 代表在第 θ 级资源点范围内:

$$a(\theta)_{i,j}^{km} = \begin{cases} 1, & \text{从资源点 } m \text{ 出发的车辆 } k \text{ 从节点 } i \text{ 到节点 } j \text{ 进行器材运输} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$t(\theta)_{i,j}^{km} = \begin{cases} 1 & (i, j, k, m) \in R(\bar{P}) / R(P) \\ 0 & (i, j, k, m) \in R(\bar{P}) \cap R(P) \\ -1 & (i, j, k, m) \in R(P) / R(\bar{P}) \end{cases}$$

5.2.3 模型构建

首先对目标函数的优先级进行定义。

定义 5.1 $P_1 > P_2$ 表示目标函数 P_1 的优先级比 P_2 的优先级高。

根据目标函数的优先级的高低, 采用字典序目标规划结构 (Lexicographic Goal Programming Structure) 构建如下混合整数规划中断恢复模型:

$$\min \text{Lex}(P_1 > P_2 > P_3 > P_4)$$

$$P_1: \sum_{k \in V'_m} \sum_{m \in D'} \sum_{i \in R} [a(\theta)_i^{km} \cdot |t_i^{km}| + \beta \cdot (1 - a(\theta)_i^{km})] \quad (5.5)$$

$$P_2: \alpha_k \sum_{k \in V'_m} \sum_{m \in D} \sum_{j \in R} t(\theta)_{0,j}^{km} d(\theta)_{0,j}^k + \sum_{k \in V'_m} \sum_{m \in D'} \sum_{i \in R} \sum_{j \in R'} \{t(\theta)_{i,j}^{km} a(\theta)_{i,j}^{km} d(\theta)_{i,j}^k + \gamma t(\theta)_{i,j}^{km} [1 - a(\theta)_{i,j}^{km}]\} \quad (5.6)$$

$$P_3: \sum_{k, l \in V'_m} \sum_{m \in D'} \sum_{i \in R} \sum_{j \in R'} \{t(\theta)_{i,j}^{km} f(\theta)_{i,j}^k + t(\theta)_{i,j}^{km} e(\theta)_i + \delta f(\theta)_{i,j}^k [1 - a(\theta)_{i,j}^{km}]\} \quad (5.7)$$

$$P_4: \alpha_k \sum_{k \in V'_m} c_0^k + \sum_{k, l \in V'_m} \sum_{m \in D'} \sum_{i \in R} \sum_{j \in R'} \{[d(\theta)_{i,j}^k c_k + r(\theta)_i^{kl}] P_k^* t(\theta)_{i,j}^{km} + \beta r_{N_n}^k [1 - a(\theta)_{i,j}^{km}]\} \quad (5.8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in G} \sum_{m \in D} \sum_{j \in R'} a(\theta)_{ijk}^m \geq 1 \quad (5.9)$$

$$\sum_{i \in R} r_i \sum_{m \in D'} \sum_{j \in R'} a(\theta)_{ijk}^m \leq Q_k \quad \forall k \in G \quad (5.10)$$

$$\sum_{m \in D'} \sum_{i \in R/\{D\}} a(\theta)_{iDk}^m - \sum_{m \in D'} \sum_{j \in R/\{D\}} a(\theta)_{Djk}^m = 0 \quad k \in G \quad (5.11)$$

$$\sum_{m \in D'} \sum_{k \in V'_m} P_k^* = Q_D \quad \forall k \in G \quad (5.12)$$

$$S_{nk}^m + d_n = S_{nk}'^m \quad n \in R, \quad k \in G \quad (5.13)$$

$$ET_n \leq S_{nk}'^m \leq LT_n \quad n \in R^*, \quad k \in V'_m \quad (5.14)$$

$$\sum_{i, j \in \{D\} \cup S(\theta)} a(\theta)_{ijk}^m = \sum_{i, j \in D \cup S(\theta)} a(\theta)_{jik}^m = 0 \quad k \in G \quad (5.15)$$

$$\alpha_k, \beta, \gamma, \delta \in \{0, 1\} \quad (5.16)$$

构建基于字典序的多目标规划模型，决策者可以根据实际情况对各目标的优先级进行排序，模型在计算时会根据各目标的重要程度依次计算。在本模型中， P_1 的优先级最高， P_4 的优先级最低。第一优先级函数式（5.5）从需求点角度考虑，保证新供应方案与初始供应方案开始服务时间的偏离最小；第二优先级函数式（5.6）从供应方案的可行性考虑，要求扰动恢复后新供应方案与初始供应方案路径的偏离最小，充分利用初始供应方案；第三优先级函数式（5.7）从运输路线角度考虑，保证新供应方案与初始供应方案的路径危险度增幅最小；第四优先级函数式（5.8）从供应成本角度考虑，保证新供应方案与初始供应方案总费用的偏离最小。

约束条件中，式（5.9）表示受扰车辆这一特殊虚拟需求点至少被访问一次；式（5.10）表示所有待服务需求点的器材需求量之和不得超过救援车辆剩余的器材装载量与从受扰车辆所取器材量之和；式（5.11）表示对于救援车辆来说，先从受扰车辆上取器材，再进行供应服务；式（5.12）表示所有参与救援的车辆从受扰车辆所取器材量之和等于受扰车辆上的器材量，以保证受扰车辆上的所有器材均被取走；式（5.13）表示新供应方案对器材需求点的开始服务时间与初始供应方案对器材需求点的开始服务时间的关系；式（5.14）表示器材需求点的时间窗约束；式（5.15）表示任何车辆都不能从资源点到资源点；式（5.16）表示对决策变量的 0-1 约束。

5.3 业务层中断恢复模型求解算法设计

5.3.1 改进的非支配排序遗传算法

上述建立的装备器材保障网络业务层中断恢复模型属于多目标优化模型。对于多目标优化模型的求解，通常可以使用两种方法：一种是将多个目标函数合成为一个目

标函数，将其转化为单目标函数求解，这种方法要求统一各目标函数的度量标准，为每个目标函数设置相应的权重；另一种是使用多目标优化算法求解，由于目标之间通常存在排斥性，这使得一个目标的改善可能会使另一个目标变差。

多目标优化问题的主要任务是在满足一定约束条件的参数空间内搜索 Pareto 最优解（非支配解集合），为了求解本书所构建的业务层中断恢复模型，本节将根据所研究问题的特点，利用改进的非支配排序遗传（NSGA-II）算法对模型进行求解^[147]。

（1）NSGA-II 算法基本思想

NSGA-II 算法是在 NSGA 算法的基础上进行改进得到的一种带精英策略的非支配排序遗传算法，NSGA-II 算法流程图如图 5.7 所示。

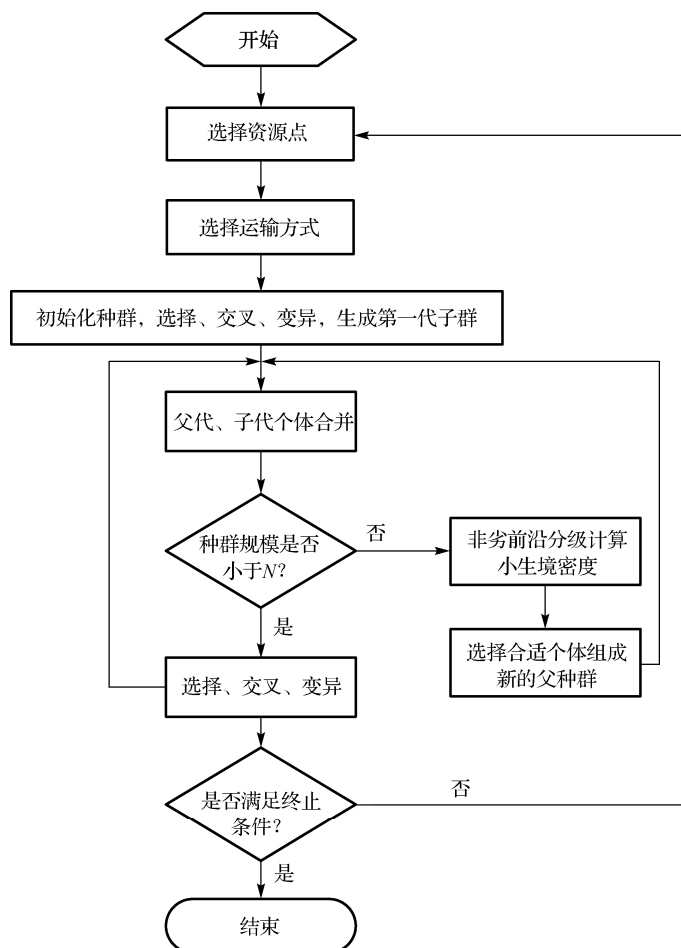


图 5.7 NSGA-II 算法流程图

① 随机产生规模为 N 的初始种群，非劣前沿分级后通过遗传算法的选择、交叉、变异三个基本操作得到第一代子群；

② 从第二代开始, 将父代种群与子代种群合并, 并进行快速非劣前沿分级, 同时对每个非劣前沿分级层中的个体进行小生境密度计算, 根据非劣前沿关系及个体小生境密度选取合适的个体组成新的父代种群;

③ 通过遗传算法的基本操作产生新的子代种群;

④ 依次类推, 直至满足程序终止准则。

相比 NSGA, NSGA-II 算法有以下优点: 一是提出了快速非支配排序法, 降低了算法的复杂性; 二是为了保持个体的多样性, NSGA-II 算法利用了小生境密度的概念, 即目标空间上某点与同等级相邻两点在各个目标函数上的相对距离之和, 这一方法使种群中的 Pareto 最优解集分布均匀, 保持了种群的多样性; 三是引入精英策略, 扩大了种群的空间。

为了提高解的质量和保持解分布的宽广性与均匀性, 针对业务层中断恢复模型针对的是一个一对多的有向路径运输问题这个特点, 下面以 NSGA-II 算法为基础, 结合所研究问题的特点, 对算法的初始解、小生境密度计算、选择策略和交叉算子等进行设计。

(2) 非劣前沿分级

为了对种群按照非劣前沿等级进行分类, 在 NSGA-II 算法中, 对每个个体 i 都设有参数 n_i 和 S_i , 其中 n_i 为种群中支配个体 i 的解的个体数量, S_i 为被个体 i 支配的解个体的集合。

首先, 利用式 (5.5)、式 (5.6)、式 (5.7)、式 (5.8) 和相应的参数求出所有个体的目标函数值, 根据支配解 (Pareto 最优解) 的定义找到种群中所有参数 $n_i = 0$ 的个体, 将它们存入集合 F_1 。

其次, 对于集合 F_1 中的每个个体 j , 考察 j 所支配的个体集合 S_j , 将集合 S_j 中的每个个体 k 的 n_k 参数减去 1, 若 $n_k = 1$, 则将个体 k 存入另一个集合 H 。

最后, 将 F_1 作为第一级非支配个体集合, 并赋予该集合内个体一个相同的非支配序 i_{rank} 。继续对 H 重复上述过程并赋予相应的非支配序, 直到所有个体都被分级。

对不同等级上的非支配序 i_{rank} 赋不同的值, 比如指定 F_1 上的非支配序 $i_{\text{rank}} = 1$, F_2 上的非支配序 $i_{\text{rank}} = 2$, 依次类推。这样, 非支配序越小的个体越靠近 Pareto 最优解, 在选择时可以获得越多的复制机会, 确保优良个体能够保持下去, 维持种群的多样性。

以双目标优化问题为例, 每个个体的非劣前沿等级是由 f_1 和 f_2 决定的, 双目标优化问题的非劣前沿等级曲线如图 5.8 所示。

若平面上有两个个体的解在同一等级曲线上, 如图 5.8 中的个体 x_1 和 x_2 , 则两个

个体的非支配序 i_{rank} 是相等的, 也就是个体 x_1 和 x_2 在同一等级。若平面上两个个体的解不在同一等级曲线上, 如图 5.8 中的个体 x_1 和 x_3 , 则表示个体 x_1 非劣于 x_3 , 即个体 x_1 支配 x_3 。如果种群经过非劣前沿分级后只能形成一个集合 F_1 , 也就是说当种群不能进行非劣前沿分级时, 对该种群中的某两个目标函数值进行非劣前沿分级, 其过程与上述相同。

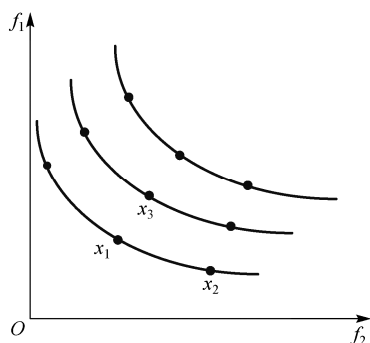


图 5.8 双目标优化问题的非劣前沿等级曲线

(3) 适应度函数与小生境密度计算

为了保持种群的多样性, 防止个体可能在局部堆积, NSGA-II 算法提出了虚拟适应度 i_d 的概念, 它指种群中每个个体与同等级之间的小生境密度 (个体与个体之间的拥挤距离)。

由于本书建立的业务层中断恢复模型是一个一对多的运输网络, 为了保持种群个体的多样性, 把由同一个资源点出发的路径划分为一个区域, 在考虑种群中每个个体的小生境密度时, 只需考虑与其在同一个等级和区域内个体之间的小生境密度。

假设 i 为 F_l 中的个体 (在实际网络中个体 i 表示一条路径), $V(i)$ 表示个体 i 中的所有节点的集合, $A(i)$ 表示个体 i 中的所有弧的集合, 个体 F_{li} 为与个体 i 在等级 F_l 中相同的区域。在等级 F_l 中个体 i 的虚拟适应度定义为

$$i_d = \sum_{j \in F_{li}} \left(\frac{|V(i) \cap V(j)|}{|V(i) \cup V(j)|} + \frac{|A(i) \cap A(j)|}{|A(i) \cup A(j)|} \right)$$

式中, $|A|$ 表示集合 A 的势。不难看出, 虚拟适应度 i_d 高, 表明该个体周围比较拥挤, 反之表明该个体周围比较稀疏。如果个体不能进行三个目标函数的非劣前沿分级, 那么先对种群中每个个体的某两个目标函数值进行非劣前沿分级, 再计算其小生境密度。

(4) 编码方式

对于路径问题, 常用的染色体编码方式有二进制编码和数值编码两种。二进制编码对于一个给定的图, 将图中的所有节点自然排列, 然后按此顺序将每个节点作为染

色体的一个基因，当基因值为 1 时，表示该节点被选入该路径，否则表示该节点未被选中。数值编码将路径依次经过的节点编号存储起来，染色体的每个基因对应着网络图中的一个节点。

虽然二进制编码有利于遗传算法的后续操作，但是针对多个节点的装备器材保障网络，二进制编码除要存储节点选择情况外，还要利用专门的存储空间来记录节点被选中的先后顺序。显然，二进制编码方式稍显复杂，并且占用了大量的存储空间，效率不高。结合模型的实际需求，这里选取数值编码方式，将模型的编号按照全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心、器材需求点、连接节点的顺序编号，每级节点内部再按下标自然顺序编号。例如，对于包含“L1-1、L2-1、L2-2、L2-3、L3-1、L3-2”这 6 个节点的网络，其编号如表 5.2 所示。

表 5.2 编号规则

节 点 编 号	新 编 号	节 点 编 号	新 编 号
L1-1	1	L2-3	4
L2-1	2	L3-1	5
L2-2	3	L3-2	6

算法中，每条染色体代表一条路径，染色体中的基因代表网络中的节点，由于每条路径的节点数不尽相同，因此染色体的长度也表现出差异性。

（5）种群初始化

由于多目标路径寻优主要考虑让各子目标尽可能小，因此，在考虑初始种群选取时，把关于各子目标的较优的个体放入交配池，使得初始化种群得到有效改善。本书利用著名的 Dijkstra 算法分别求出网络中每个保障任务的最短路径，选择前 N 条作为初始种群。

（6）选择策略

经过排序和计算虚拟适应度，群体中的每个个体 i 都具备了两个属性：非支配序 i_{rank} 和小生境密度 i_d 。为了选择较优个体，定义偏序关系“ $>$ ”如下。

对种群中的个体 i 和个体 j ，当满足条件 $i_{\text{rank}} < j_{\text{rank}}$ ，或者 $i_{\text{rank}} = j_{\text{rank}}$ 且 $i_d < j_d$ 时，定义 $i > j$ 。也就是说，当两个个体的非支配排序不同时，取非支配序较小的个体；当两个个体在同一等级时，则取虚拟适应度较小的个体（周围不太拥挤的个体）。使用这一方法可以使种群的进化朝着非劣解和均匀分布的方向进行，从而提高算法的收敛速度。

（7）交叉操作

交叉是指把两个父代个体进行交换而生成新个体的过程，也称为基因重组。交叉的目的是能够在下一代中产生新的优良个体，通过交叉操作，遗传算法的搜索能力得

到较快的提高,避免种群陷入局部最优解。染色体的交叉方法有很多,常见的有随机交叉、单点交叉、双点交叉等。本节所考虑的问题为多目标路径寻优,因而采用连通路径交叉法,即随机选择两条不同的父代染色体 x 和 y ,在 x 中随机选取基因 a 并将其分为 x_1 和 x_2 ,同样在 y 中也随机选取基因 b 并将其分为 y_1 和 y_2 ,交叉前的染色体如图5.9所示。

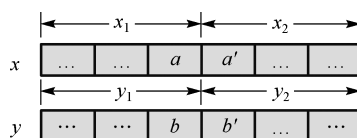


图 5.9 交叉前的染色体

当 a 与 b 为同一点时,则 x 和 y 交叉后产生的新个体为 x_1y_2 和 y_1x_2 ;当 a 与 b 不是同一点时,则利用 Dijkstra 算法求出 x_1 的终点 a 到 y_2 的起点 b' 和 y_1 的终点 b 到 x_2 的起点 a' 的最短路径,使得 x_1 和 y_2 连通、 y_1 和 x_2 连通,交叉后的染色体如图5.10所示。

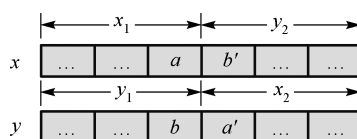


图 5.10 交叉后的染色体

交叉操作可能产生回路,本书采用将路径中的相同节点放在一起的方法来减小回路产生的概率。

(8) 变异操作

变异操作是指将个体染色体编码串的某些基因进行变动,从而形成新的个体,它决定了遗传算法的局部搜索能力。为了维持种群的多样性,防止出现早熟现象,应设置一定的变异概率。但是如果变异概率过大,则往往会破坏种群中优良的个体,使得收敛性大大降低;变异概率选择得过小,则会降低收敛速度,出现求解时间过长的现象。因此,必须要选择合适的变异概率。本书选取路径中的一条子路径进行变异,具体步骤为:对染色体 x ,随机选取染色体 x 中的两个基因 a 和 b ,然后随机生成以 a 为起点、 b 为终点的路径 x' ,将路径 x' 代替染色体 x 中的 (a,b) 路径,如图5.11所示。若变异后的路径中产生了回路,则使用处理交叉操作产生回路的方法来消除。

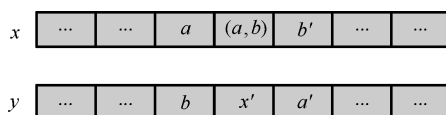


图 5.11 变异路径

(9) 精英保留策略

为了保留优良的个体,可采用精英保留策略,具体步骤为:首先,将父代 $Q(t)$ 和子代 $P(t)$ 合成一个种群 $\Gamma(t) = Q(t) \cup P(t)$, 将其放入进化池中,这样,种群 $\Gamma(t)$ 的个数为 $2N$; 其次,分别计算种群 $\Gamma(t)$ 中的每个个体的非支配序和小生境密度,依据等级的高低逐一选取个体,直到个体总数达到 N ; 循环执行上述步骤,形成新一轮的父代种群,并在此基础上进行新一轮的选择、交叉、变异,形成新的子代种群;依次类推,直到进化结束。

为了防止在进化过程中丢失优良个体,将每代的最优非劣等级中的非劣解集 ($i_{\text{rank}} = 1$) F_{lg} 合并为一个集合 $\Phi = \bigcup_{g=1}^{\text{max gen}} F_{\text{lg}}$, 其中 max gen 为遗传算法的迭代次数,然后求出 Φ 中的非劣解集,作为最后的计算结果。

5.3.2 算法执行流程

5.3.1 节对算法的关键环节进行了分析与设计,本节给出算法的具体执行步骤。

步骤 1: 初始化参数,令 $k=1$, 构造资源点集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, $k = \{1, 2, \dots, l\}$ 代表需求点;

步骤 2: 令 $j=0$, $s_j \in S$, j 为资源点的下标。

步骤 3: 对于需求点 D_k 和资源点 s_j , 设定算法终止准则,设定种群规模 N 和最大迭代次数 max gen , 设交叉概率 $p_c = 0.8$ 、变异概率 $p_m = 0.05$, 令 $i=0$, $\Phi_j^k(i) = \emptyset$, 利用第 4 章的 Dijkstra 算法分别求出网络中每个需求点的最短路径作为初始种群 $\Omega_k(0)$, 对其进行选择、交叉和变异,产生第一代种群 $P_k(0)$ 。

步骤 4: 进入迭代循环 $i=1$, i 代表迭代步数。

步骤 5: 对种群 $\Omega_k(i)$ 进行交叉和变异操作,得到 N 个后代个体集 $P_k(i)$ 。

步骤 6: 记 $\Gamma(i) = \Omega_k(i) \cup P_k(i)$, 计算 $\Gamma(i)$ 中每个个体的非支配序 i_{rank} 和小生境密度 i_d , 并进行非劣前沿分级,利用精英策略保留方法选择 $\Gamma(i)$ 中较好的 N 个个体组成新的父代种群 $\Omega_k(i+1)$, 并记 $\Gamma(i)$ 中非支配序 $i_{\text{rank}} = 1$ 的等级为 F_i , 令 $\Phi_j^k(i+1) = \Phi_j^k(i) \cup F_i$ 。

步骤 7: 若 $i < \text{max gen}$, 则令 $i = i+1$, 转步骤 4; 若 $i = \text{max gen}$, $j < n$, 则令 $j = j+1$, 转步骤 3; 若 $i = \text{max gen}$, $j = n$, $k < l$, 则令 $k = k+1$, 转步骤 2; 若 $i = \text{max gen}$, $j = n$, $k = l$, 则转步骤 8。

步骤 8: 对于 $\forall k \in \{1, 2, \dots, l\}$, 令 $\Phi^k = \bigcup_{j=1}^n \Phi_j^k(\text{max gen})$, 计算 Φ^k 中的非支配序 i_{rank} 和小生境密度 i_d , 并进行非劣前沿分级,选出前 N 条优化路径并输出,算法结束。

NSGA-II 算法运行在 MyEclipse 8.5 平台上，基于 Java 语言进行实现。

5.3.3 算法复杂度分析

该算法的复杂度主要取决于种群规模的大小及算法的最大迭代次数。种群规模为 N ，目标函数包括时间、路径、安全性、总费用这 4 个，最大迭代次数设为 g_{\max} ，需求点数量设为 $|L|$ ，资源点数量设为 $|S|$ 。算法需要计算种群中 N 个个体的非支配序 i_{rank} 和小生境密度 i_d ，再按照 i_{rank} 和 i_d 对每个个体进行非劣前沿分级，因此计算时间为 $O(3N^2)$ ，加上算法的最大迭代次数、资源点数量及需求点数量，该算法的复杂度为 $O(g_{\max} |S| |L| N^2)$ 。

5.4 装备器材保障网络业务层中断恢复算例

为验证本书所构建的中断恢复模型及算法的有效性，本节将设计一个中断恢复算例，并分析和总结实验结果。

5.4.1 实验数据

本节用 4.3.1 节的数据作为基础。本章考虑的网络更接近实际业务，增加了节点和边的危险性系数，考虑了保障费用等情况，还需要对 4.3.1 节的网络做适当调整。

(1) 节点和边的危险性系数

网络中的节点包括区域保障中心、群点保障中心、需求点和连接节点，显然，对于一项保障任务，该任务涉及的任意节点被中断，都有可能影响后面没有接受器材服务的节点。各级保障中心有自身的防卫力量，并且保障中心级别越高，其作用越重要，配属的防卫力量越强，它们在面临外界干扰时所表现出来的危险性系数就越小，在所有节点中，连接节点的危险性系数最大。假定连接节点没有任何防御力量，其危险性系数最大，设定为 1，区域保障中心在该网络中的级别最高，设其危险性系数为 0.1，其他节点参照连接节点和区域保障中心节点的危险性系数设定，如表 5.3 所示。

表 5.3 节点危险性系数

序 号	节 点 类 型	危险性系数
1	区域保障中心	0.1
2	群点保障中心	0.5
3	需求点	0.75
4	连接节点	1

至于边的危险性系数，根据该边两端的节点类型确定其危险性系数，与危险性系数越小的节点连接的边，其危险性系数就越小，反之亦然。边的危险性系数计算公式为

$$e(\theta)_{ij} = \text{Random}[e(\theta)_i, e(\theta)_j]$$

此式表示边的危险性系数是介于两端节点危险性系数之间的一个随机数。

(2) 保障费用

这里的保障费用主要指运输费用和中转费用。其中，运输费用由车辆的燃油、磨损等产生，中转费用由中转过程中的人力、中转工具等产生。运输费用只与运输方式有关，中转费用只与中转前、后的运输方式有关。保障费用表如表 5.4 所示。

表 5.4 保障费用表

编 号	运 输 方 式	单位器材的每千米运输费用/元	编 号	中 转 方 式	中转费用/元
1	公路	20	1	公路→铁路	120
2	铁路	15	2	铁路→公路	100

另外，部分节点还涉及装卸载时间和装卸载费用，如表 5.5 所示。

表 5.5 各种运输方式之间单位器材的装卸载时间与装卸载费用

	公 路	铁 路
公路	0/0/0/0	200/100/0.25/0.2
铁路	180/110/0.2/0.2	90/90/0.1/0.1

注：对于 a 、 b 、 c 、 d ，其中 a 为装载费用， b 为卸载费用， c 为装载时间， d 为卸载时间， a 、 b 的单位为元， c 、 d 的单位为小时。

对 4.3.1 节的网络做出如上调整后，在此基础上进一步对保障任务做出假设。假设有一项紧急任务需要大批器材，而需求点所对应的群点保障中心由于库存不足无法对其实施保障。为此，区域保障中心决定实施区域内联合应急器材保障，调配区域内相关保障力量（包括区域保障中心和各群点保障中心）对需求点实施调配保障与越级保障。各需求点的器材需求量及用户最大等待时间如表 5.6 所示。

表 5.6 各需求点的器材需求量及用户最大等待时间

编 号	需 求 点	需 求 量	用户最大等待时间/min	编 号	需 求 点	需 求 量	用户最大等待时间/min
1	L4-30	107	30	6	L4-34	86	60
2	L4-32	87	140	7	L4-33	55	90
3	L4-31	96	130	8	L4-22	95	60
4	L4-28	43	60	9	L4-24	67	90
5	L4-29	65	100	10	L4-26	61	100

经区域保障中心决策，由群点保障中心 L3-4 负责需求点 L4-30、L4-32、L4-31，其余需求点由区域保障中心 L2-1 直接对其实施越级供应。初始供应方案如表 5.7 所示。

表 5.7 初始供应方案

车 辆 编 号	车辆总空间	携带器材量	初始运输路线
1	300	290	L3-4→L5-8→L4-30→L5-8→L3-5→L4-32→L4-31→L3-4
2	120	108	L2-1→L5-10→L5-9→L4-28→L4-29→L2-1
3	250	223	L2-1→L5-11→L4-22→L4-24→L2-1
4	150	141	L2-1→L5-19→L4-34→L5-14→L4-33→L2-1

在某时刻，网络受到外界干扰：车辆 1 在从节点 L3-5 到节点 L4-32 的道路上遭到袭击，车辆被损坏，不能在有效时间内修复，袭击导致部分器材损失，损失量为 60，且边 r 被中断；车辆 3 在由节点 L2-1 向节点 L5-11 行驶的过程中，节点 L5-11 被中断，车辆无法按照预定路线前行。根据以上情况，指挥决策部门依据网络中断应急预案实施中断救援。中断发生时刻各任务的执行状态如图 5.12 所示，其中，左侧的实心圆圈代表资源点，车辆从资源点出发，完成保障任务后返回资源点，忽略车辆返回资源点的时间。小方框代表运输过程中经过的非需求点节点，实心小方框代表已经经过了该节点，空心小方框代表尚未经过该节点。小圆圈代表需求点，实心小圆圈代表该需求点已经被服务过，空心小圆圈代表尚未被服务。

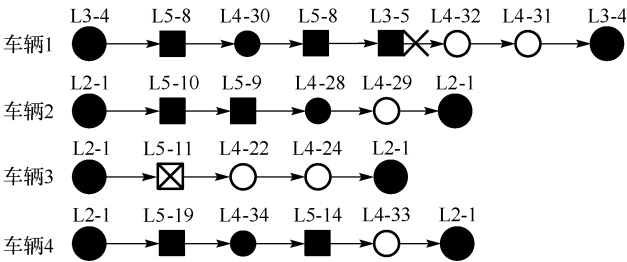


图 5.12 中断发生时刻各任务的执行状态

5.4.2 恢复策略确定

保障任务一共安排 4 辆车负责器材运输，车辆 1 负责 L4-30、L4-32 和 L4-31 三个需求点，车辆 2 负责 L4-28 和 L4-29 两个需求点，车辆 3 负责 L4-22、L4-24 和 L4-26 三个需求点，车辆 4 负责 L4-34、L4-33 两个需求点。在任务执行过程中，节点 L5-11 和路径 $E(L3-5, L4-32)$ 遭到中断，导致车辆 1 和车辆 3 的运输任务受到干扰，其中车辆 1 器材损失量为 60。中断发生时刻各车辆的剩余装载空间如表 5.8 所示。

表 5.8 中断发生时刻各车辆的剩余装载空间

车 辆 编 号	车辆总空间	携带器材量	已供应器材量	剩余装载空间
1	300	290	107	117
2	120	108	43	55
3	250	223	0	27
4	150	141	86	95

对于车辆 3，由于车辆本身未受到中断影响，根据业务层恢复策略确定原则，将返回节点 L2-1，通过重新选择路径的方法继续完成保障任务。

对于车辆 1，由于车辆损坏，在有效时间内不能进行修复，且部分器材损坏，需要通过他救策略来恢复保障业务。中断发生后，车辆 1 已供应器材量为 107，待供应器材量为 183，中断造成 60 件器材的损失量，因此待救援器材数量为 123。从表 5.8 可以得知，可以用于救援的车辆为车辆 2 和车辆 4，且两辆车的剩余装载空间均不能独自装载全部待救援器材。因此，根据业务层恢复策略确定原则，车辆 2 和车辆 4 对车辆 1 实施联合救援。

5.4.3 实验结果

根据本书建立的业务层中断恢复模型及设计的算法，参数设置为：种群规模 $N=150$ ，交叉概率 $p_c=0.8$ ，变异概率 $p_m=0.05$ ，最大迭代次数 $\max \text{ gen}=500$ ，新增行驶路径的惩罚因子 $\gamma=3$ ，新增路径危险度的惩罚因子 $\delta=5$ ，增派车辆 k 的固定运输费用 $c_0^k=21$ ，增派车辆 k 的惩罚因子 $a_k=3$ ，不能服务需求点的惩罚因子 $\beta=11$ 。为了将本书的计算成果与传统的重调度模型的计算结果进行对比，采用传统重调度模型，用同样的参数进行计算，计算结果及对比情况如表 5.9 所示。

从计算结果看，本书所构建的中断恢复模型的优化效果非常明显，优化比例都在 10%以上，服务时间偏离、危险度偏离、供应费用偏离都有较大幅度减小，证明本书所构建的模型方法用于解决装备器材保障网络业务层中断恢复问题是有效的。

表 5.9 计算结果及对比情况

	服务时间偏离	危险度偏离	路 径 偏 离	供应费用偏离
传统的重调度模型	3.25h	4.9	215.1km	3780 元
中断恢复模型	2.43h	3.7	187.4km	2466 元
优化比例	25.23%	24.49%	12.88%	34.76%

5.4.4 中断恢复后的业务层抗毁性

为了进一步说明本书所构建的中断恢复模型的有效性，分析在按照原保障计划和

按照中断恢复策略下的调整计划两种情况下，器材到达率和用户等待时间两项业务层抗毁性指标的对比情况。在计算器材到达率时，定义惩罚因子的计算方法为

$$\phi = \begin{cases} 0, & WT_0 \leq WT_{\max} \\ \frac{WT_0 - WT_{\max}}{WT_{\max}}, & WT_{\max} < WT_0 < 2WT_{\max} \\ 1, & WT_0 \geq 2WT_{\max} \end{cases} \quad (5.17)$$

式中， WT_{\max} 表示用户最大等待时间， WT_0 表示器材实际到达需求点消耗的时间。

图 5.13 所示为中断前、后用户等待时间的对比情况，其中，横轴代表需求点的编号，纵轴代表用户等待时间，单位是分钟。中断前等待时间是指按照初始供应路线将器材配送到各需求点需要消耗的时间，中断后等待时间是指按照中断恢复策略将器材供应到各需求点需要消耗的时间。

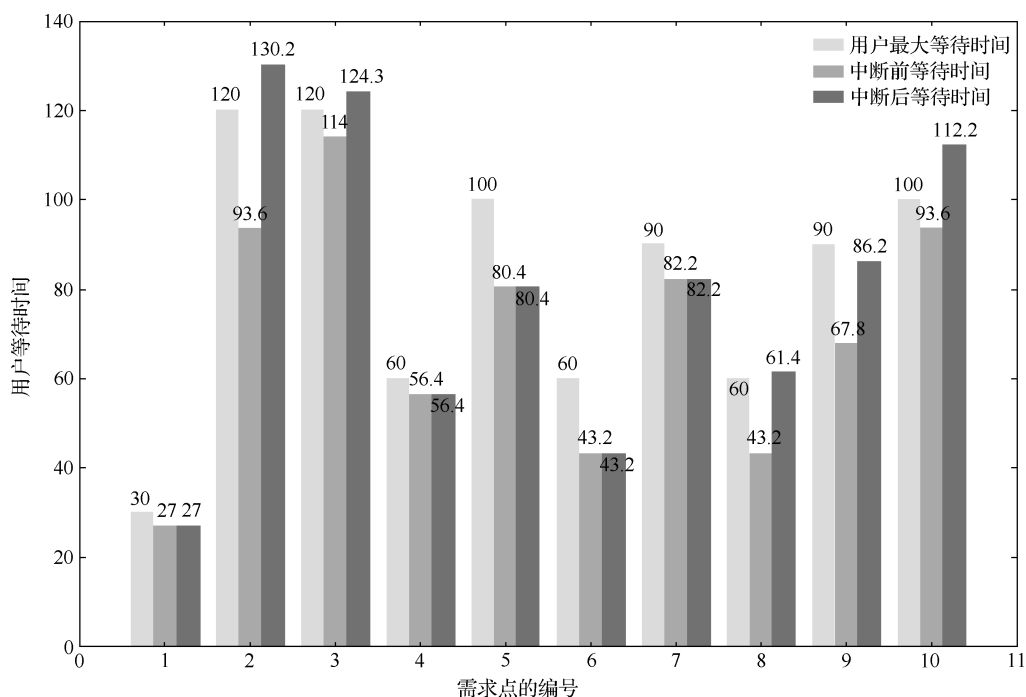


图 5.13 中断前、后用户等待时间的对比情况

从图中可以看出，编号为 1、4、5、6、7 的需求点，中断前、后用户等待时间都没有变化，这是因为在中断发生之前，需求点已经获得了所需的器材，虽然车辆 4 参与救援，但是中断未对车辆 4 的既定行驶路线造成影响。因此，外界中断未对这 5 个需求点的用户等待时间造成影响。对于其他需求点，外界中断都对其造成了影响，导致器材供应时间比计划时间延长。但从结果来看，除需求点 2 和需求点 10 的用户等待

时间大于用户最大等待时间外，其他都与用户最大等待时间较接近。由此可见，中断救援策略基本保证了用户等待时间上的要求。

图 5.14 所示为中断前、后器材到达率的对比情况，其中，横轴代表需求点的编号，纵轴代表器材到达率。中断前器材到达率是指按照初始供应路线将器材在用户最大等待时间内配送到各需求点的数量占该需求点原始需求量的比例，中断后器材到达率是指按照中断恢复策略将器材在用户最大等待时间内供应到各需求点的数量占该需求点原始需求量的比例。

从图中可以看出，需求点 2 和需求点 3 由于车辆 1 受到中断而影响器材到达率，主要原因是车辆 1 遭到袭击导致部分器材损失，从而使器材到达率减小。需求点 8 和需求点 10 由于没有在用户最大等待时间内获得器材，实际到货量被加上了惩罚因子，从而导致器材到达率没有达到 100%。除此之外，其他所有需求点都在用户最大等待时间内获得了所需的器材。由此可见，中断恢复策略能够保证大部分需求点获得满意的器材到达率。

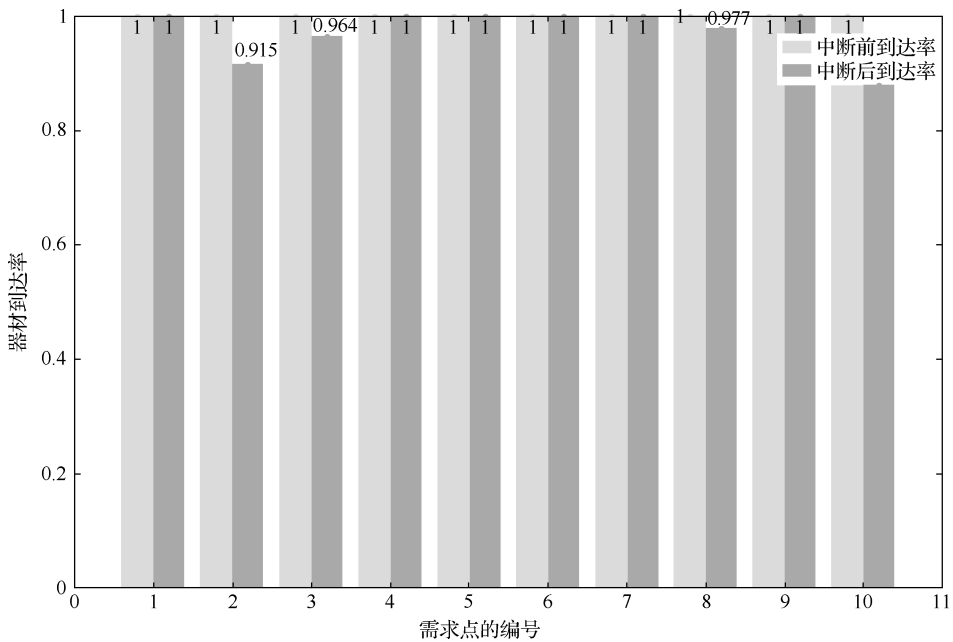


图 5.14 中断前、后器材到达率的对比情况

通过中断前、后业务层抗毁性指标的分析可以得出结论，外界中断对器材保障业务产生了一定的影响，但是通过本书所研究的业务层中断恢复策略，将这种不利影响降低到了一个可以接受的水平，本书所构建的业务中断恢复模型及算法能够有效解决装备器材保障网络业务层中断问题。

5.5 本章小结

本章基于干扰理论, 针对装备器材保障网络遭受蓄意攻击容易对保障业务产生严重影响的问题展开研究。在对业务层中断恢复问题进行充分分析的基础上, 构建了业务层中断恢复多目标模型, 采用基于 NSGA-II 的模型求解算法, 设计中断恢复算例对模型和算法进行了验证。实验结果表明, 本章所研究的内容能够有效地解决装备器材保障网络业务层中断恢复问题。

干扰管理理论在网络恢复方面有着广泛而深入的研究和应用背景, 本书采用干扰管理理论的思想, 对装备器材保障网络业务层中断恢复问题进行研究, 丰富和完善了干扰管理理论在军事保障领域中的应用, 为装备器材供应干扰指挥调度决策提供了理论依据和方法支撑。

第6章 结论与展望

6.1 主要完成的工作

装备保障建设是我军军事转型中的一项重要任务，器材保障是装备保障建设的重要内容之一。本书在深入分析和总结现行保障模式特点的基础上，以“四合四统”为基本思想，以构建适应未来一体化联合作战的装备器材保障模式为牵引，基于区域物流理论，提出了装备器材保障模式，并在此基础上研究了保障网络设计的关键技术、抗毁性度量方法及业务层抗毁性优化。回顾本书的研究工作，主要完成了以下几个方面的内容。

（1）构建了基于区域保障的装备器材保障模式。

随着我军装备保障改革的深入，装备保障（特别是装备器材保障）需要建立新的保障模式，用于指导装备保障建设。本书在结合前人研究成果、借鉴地方区域物流思想的基础上，构建了基于区域保障的装备器材保障模式。在新的保障模式下，将全军划分为若干区域。平时条件下实施“建制保障为主，区域内调剂保障为辅”的保障机制，有利于提高器材在全军范围内的流动率，为目前大量呆滞器材得不到有效利用的问题提供解决途径。战时条件下则在指挥机构的统一调度下实施跨区域联合保障，有利于快速组织器材保障力量，在短时间内形成有效的保障能力。

本书所构建的装备器材保障模式具有专业合并管理、分级划区保障、综合集成运行的特点，符合“四合四统”的基本原则，在保障模式运行机制上能有效弥补现行保障模式下出现的一些不足。

（2）研究了装备器材保障网络设计的关键技术。

全军保障中心、区域保障中心、群点保障中心三级资源点是装备器材保障网络中节点的主要构成要素，各级保障中心的选址方法是装备器材保障网络设计的关键技术。为了在网络设计过程中兼顾网络的抗毁性和经济性，将资源点选址问题划分为两个阶段：初选阶段基于群决策理论确定候选资源点，重点考虑抗毁性；终选阶段基于双层混合整数规划模型确定资源点与需求点的服务关系，重点考虑经济性。

研究表明，所构建的两阶段选址方法能够有效满足装备器材保障网络在设计

过程中兼顾经济性和抗毁性的要求。

(3) 研究了装备器材保障网络抗毁性测度度量方法。

抗毁性测度指标是评价网络抗毁性的最基本途径,针对装备器材保障网络的层次性特点,分别在物理层和业务层构建了网络拓扑结构抗毁性测度指标和保障业务抗毁性测度指标,并设计了抗毁性测度指标的关键算法。针对保障网络在未来战场上可能遭遇的信息对称和信息不对称两种战场环境,设置随机攻击和蓄意攻击两种攻击策略,通过抗毁性实验,一方面检验了设计的抗毁性测度指标在反映网络抗毁性上的能力,另一方面通过实验得出了装备器材保障网络的抗毁性。

研究表明,所构建的抗毁性测度指标体系能够有效评估装备器材保障网络的抗毁性。

(4) 研究了装备器材保障网络业务层抗毁性优化策略。

当装备器材保障网络遭受外界因素中断时,运行在网络中的保障业务非常容易受到影响。针对这一问题,基于干扰管理的思想,提出了以自我救援、顺路救援、邻近救援、增派救援为基本救援方式的装备器材保障网络业务层中断恢复策略,构建了以追加时间最小、追加距离最短、路径危险度最小、追加总费用最低的多目标中断恢复模型,针对多目标模型求解的复杂性,设计了基于 NSGA-II 的启发式求解算法,并通过算例对相关研究内容进行了检验。

研究表明,本书所研究的中断恢复策略能够有效解决装备器材保障网络业务中断恢复问题。

6.2 创 新 点

(1) 针对现行保障模式存在的不足,借鉴区域物流的思想,结合我军装备器材保障的特点,系统构建了基于区域保障的装备器材保障模式,探索了优化装备器材保障的军事效益的方法。该保障模式的提出丰富和完善了区域物流理论在装备器材保障领域的应用,对“四合四统”思想进行了理论实践,对于改革与创新装备器材保障理论、探索装备器材保障方法都具有一定的借鉴意义。

(2) 针对装备器材保障网络设计需要兼顾经济性和抗毁性的问题,设计了两阶段选址方法。将选址问题作为装备器材保障网络设计的关键技术,在选址过程中综合考虑普遍关心的运行成本和网络抗毁性,分阶段、分步骤实施各级保障中心选址。该问题的研究为构建兼顾平时与战时需要的装备器材保障网络提供了理论依据和方法支撑。

(3) 为度量装备器材保障网络的抗毁性, 提出了一套网络抗毁性测度方法。该方法的提出丰富和完善了网络抗毁性理论与方法在军事保障领域中的应用, 不仅有助于量化装备器材保障网络的抗毁性, 对于更广范围的军事物资保障网络的抗毁性度量也具有借鉴价值。

(4) 针对装备器材保障网络业务容易受外界中断干扰的问题, 从恢复策略、模型和算法上探讨了解决该问题的理论与方法。该问题的研究拓展了干扰管理理论在军事保障领域中的应用, 为解决保障业务部分中断情况下的装备器材供应干扰指挥调度决策问题提供了理论依据和方法支撑。

6.3 展 望

由于时间有限, 研究内容深广, 本书还有很多没有完善之处, 在未来的科研中还需要补充和完善。

(1) 从组织管理学的角度进一步深入研究基于区域保障的装备器材保障模式的组织结构及运行机制。

本书建立了基于区域保障的装备器材保障模式, 但在各级组织结构的职能及运行机制方面的研究还略显单薄。应当从组织管理学的角度对新模式的组织结构、运行机制等进行进一步研究。

(2) 考虑被攻击点可恢复的情况, 考虑攻防成功概率及不完全信息攻击。

本书在研究网络抗毁性时有两点假设: 一是被攻击的点不能在有效时间内恢复; 二是攻防信息对于双方来说都是透明的。实际上, 被攻击的点存在一个恢复概率问题, 而且攻防都存在攻防成功概率, 现实中的攻防决策不可能完全建立在完全信息攻击的基础上。因此, 可以从被攻击的点可恢复、考虑攻防成功概率和不完全信息攻击等角度深入研究, 当然, 研究的难度也非常大。

(3) 研究装备器材供应干扰应急调度指挥决策支持系统。

第5章从模型和方法的角度研究了如何应对外界对装备器材保障业务的干扰问题, 为相关的指挥决策部门提供了方法支撑。但是, 这部分研究成果离实际应用还有一定的差距, 必须依托一套干扰应急指挥调度决策支持系统才可以产生实际应用价值。

附录 候选保障中心初选数据

表 1 专家 1 打分表

	自 然 条 件	交 通 条 件	安 全 条 件	公共设施条件	政治及经济环境
备选点 1	FH	H	FC	FC	C
备选点 2	HH	FH	HC	YB	FH
备选点 3	HC	HC	HH	C	FC
备选点 4	H	FC	HH	C	H
备选点 5	FH	YB	FC	YB	HC
备选点 6	HH	C	FH	FC	HH
备选点 7	FH	YB	H	FH	HH
备选点 8	FH	H	HH	C	H
备选点 9	C	FH	HC	C	FH
备选点 10	YB	HH	FC	FH	YB
备选点 11	HH	C	C	FH	YB
备选点 12	H	HC	HH	HH	C
备选点 13	C	FC	HC	FH	HH
备选点 14	C	FC	YB	C	H
备选点 15	C	FH	C	FH	HC
备选点 16	HH	FC	HH	C	FH
备选点 17	HH	HH	C	HC	C
备选点 18	H	HC	YB	C	YB
备选点 19	FC	HH	FC	HH	YB
备选点 20	H	HC	H	YB	C

表 2 专家 2 打分表

	自 然 条 件	交 通 条 件	安 全 条 件	公共设施条件	政治及经济环境
备选点 1	HH	FH	YB	HH	FH
备选点 2	FC	C	FH	FC	YB
备选点 3	H	FH	FC	H	HC
备选点 4	C	H	FH	C	FH
备选点 5	H	HC	YB	H	FH
备选点 6	YB	H	YB	FC	H
备选点 7	HC	HH	FH	HC	C
备选点 8	YB	FC	C	YB	FC
备选点 9	C	HC	HH	YB	YB
备选点 10	FC	HC	YB	HC	YB

续表

	自然条件	交通条件	安全条件	公共设施条件	政治及经济环境
备选点 11	C	H	HC	HH	FC
备选点 12	FH	FC	C	HC	HH
备选点 13	HC	FC	HH	HC	HH
备选点 14	FC	HC	HC	YB	HC
备选点 15	C	HC	FH	FC	YB
备选点 16	C	HH	C	FH	FH
备选点 17	HC	HH	C	C	FC
备选点 18	C	YB	FH	HC	HH
备选点 19	YB	FH	HC	H	HH
备选点 20	YB	HH	H	HC	FC

表 3 专家 3 打分表

	自然条件	交通条件	安全条件	公共设施条件	政治及经济环境
备选点 1	H	HH	YB	YB	FH
备选点 2	HC	H	FH	FC	H
备选点 3	HC	HH	YB	FC	HC
备选点 4	FH	FC	FH	FH	C
备选点 5	YB	HH	H	FH	H
备选点 6	HH	H	C	FH	FC
备选点 7	YB	FC	H	HC	YB
备选点 8	HC	H	FH	FH	HC
备选点 9	HH	H	HH	C	H
备选点 10	FH	FC	YB	HH	YB
备选点 11	FH	HC	FC	FC	H
备选点 12	HC	FC	HC	C	C
备选点 13	FH	HH	C	H	FC
备选点 14	C	FH	C	H	HH
备选点 15	C	H	HC	HH	HC
备选点 16	FH	FC	FC	HC	YB
备选点 17	HH	FC	FC	HC	HH
备选点 18	FC	YB	FC	C	FC
备选点 19	FH	FC	HH	C	FH
备选点 20	YB	HH	YB	YB	YB

表 4 专家 1 二元语义决策矩阵 B^1

	自然条件	交通条件	安全条件	公共设施条件	政治及经济环境
备选点 1	(FH,0)	(H,0)	(FC,0)	(FC,0)	(C,0)
备选点 2	(HH,0)	(FH,0)	(HC,0)	(YB,0)	(FH,0)

续表

	自然条件	交通条件	安全条件	公共设施条件	政治及经济环境
备选点 3	(HC,0)	(HC,0)	(HH,0)	(C,0)	(FC,0)
备选点 4	(H,0)	(FC,0)	(HH,0)	(C,0)	(H,0)
备选点 5	(FH,0)	(YB,0)	(FC,0)	(YB,0)	(HC,0)
备选点 6	(HH,0)	(C,0)	(FH,0)	(FC,0)	(HH,0)
备选点 7	(FH,0)	(YB,0)	(H,0)	(FH,0)	(HH,0)
备选点 8	(FH,0)	(H,0)	(HH,0)	(C,0)	(H,0)
备选点 9	(C,0)	(FH,0)	(HC,0)	(C,0)	(FH,0)
备选点 10	(YB,0)	(HH,0)	(FC,0)	(FH,0)	(YB,0)
备选点 11	(HH,0)	(C,0)	(C,0)	(FH,0)	(YB,0)
备选点 12	(H,0)	(HC,0)	(HH,0)	(HH,0)	(C,0)
备选点 13	(C,0)	(FC,0)	(HC,0)	(FH,0)	(HH,0)
备选点 14	(C,0)	(FC,0)	(YB,0)	(C,0)	(H,0)
备选点 15	(C,0)	(FH,0)	(C,0)	(FH,0)	(HC,0)
备选点 16	(HH,0)	(FC,0)	(HH,0)	(C,0)	(FH,0)
备选点 17	(HH,0)	(HH,0)	(C,0)	(HC,0)	(C,0)
备选点 18	(H,0)	(HC,0)	(YB,0)	(C,0)	(YB,0)
备选点 19	(FC,0)	(HH,0)	(FC,0)	(HH,0)	(YB,0)
备选点 20	(H,0)	(HC,0)	(H,0)	(YB,0)	(C,0)

表 5 专家 2 二元语义决策矩阵 B^2

	自然条件	交通条件	安全条件	公共设施条件	政治及经济环境
备选点 1	(HH,0)	(FH,0)	(YB,0)	(HH,0)	(FH,0)
备选点 2	(FC,0)	(C,0)	(FH,0)	(FC,0)	(YB,0)
备选点 3	(H,0)	(FH,0)	(FC,0)	(H,0)	(HC,0)
备选点 4	(C,0)	(H,0)	(FH,0)	(C,0)	(FH,0)
备选点 5	(H,0)	(HC,0)	(YB,0)	(H,0)	(FH,0)
备选点 6	(YB,0)	(H,0)	(YB,0)	(FC,0)	(H,0)
备选点 7	(HC,0)	(HH,0)	(FH,0)	(HC,0)	(C,0)
备选点 8	(YB,0)	(FC,0)	(C,0)	(YB,0)	(FC,0)
备选点 9	(C,0)	(HC,0)	(HH,0)	(YB,0)	(YB,0)
备选点 10	(FC,0)	(HC,0)	(YB,0)	(HC,0)	(YB,0)
备选点 11	(C,0)	(H,0)	(HC,0)	(HH,0)	(FC,0)
备选点 12	(FH,0)	(FC,0)	(C,0)	(HC,0)	(HH,0)
备选点 13	(HC,0)	(FC,0)	(HH,0)	(HC,0)	(HH,0)
备选点 14	(FC,0)	(HC,0)	(HC,0)	(YB,0)	(HC,0)
备选点 15	(C,0)	(HC,0)	(FH,0)	(FC,0)	(YB,0)
备选点 16	(C,0)	(HH,0)	(C,0)	(FH,0)	(FH,0)
备选点 17	(HC,0)	(HH,0)	(C,0)	(C,0)	(FC,0)

续表

	自然条件	交通条件	安全条件	公共设施条件	政治及经济环境
备选点 18	(C,0)	(YB,0)	(FH,0)	(HC,0)	(HH,0)
备选点 19	(YB,0)	(FH,0)	(HC,0)	(H,0)	(HH,0)
备选点 20	(YB,0)	(HH,0)	(H,0)	(HC,0)	(FC,0)

表 6 专家 3 二元语义决策矩阵 B^3

	自然条件	交通条件	安全条件	公共设施条件	政治及经济环境
备选点 1	(H,0)	(HH,0)	(YB,0)	(YB,0)	(FH,0)
备选点 2	(HC,0)	(H,0)	(FH,0)	(FC,0)	(H,0)
备选点 3	(HC,0)	(HH,0)	(YB,0)	(FC,0)	(HC,0)
备选点 4	(FH,0)	(FC,0)	(FH,0)	(FH,0)	(C,0)
备选点 5	(YB,0)	(HH,0)	(H,0)	(FH,0)	(H,0)
备选点 6	(HH,0)	(H,0)	(C,0)	(FH,0)	(FC,0)
备选点 7	(YB,0)	(FC,0)	(H,0)	(HC,0)	(YB,0)
备选点 8	(HC,0)	(H,0)	(FH,0)	(FH,0)	(HC,0)
备选点 9	(HH,0)	(H,0)	(HH,0)	(C,0)	(H,0)
备选点 10	(FH,0)	(FC,0)	(YB,0)	(HH,0)	(YB,0)
备选点 11	(FH,0)	(HC,0)	(FC,0)	(FC,0)	(H,0)
备选点 12	(HC,0)	(FC,0)	(HC,0)	(C,0)	(C,0)
备选点 13	(FH,0)	(HH,0)	(C,0)	(H,0)	(FC,0)
备选点 14	(C,0)	(FH,0)	(C,0)	(H,0)	(HH,0)
备选点 15	(C,0)	(H,0)	(HC,0)	(HH,0)	(HC,0)
备选点 16	(FH,0)	(FC,0)	(FC,0)	(HC,0)	(YB,0)
备选点 17	(HH,0)	(FC,0)	(FC,0)	(HC,0)	(HH,0)
备选点 18	(FC,0)	(YB,0)	(FC,0)	(C,0)	(FC,0)
备选点 19	(FH,0)	(FC,0)	(HH,0)	(C,0)	(FH,0)
备选点 20	(YB,0)	(HH,0)	(YB,0)	(YB,0)	(YB,0)

参 考 文 献

- [1] 张子丘, 王建平. 装备技术保障概论[M]. 北京: 军事科学出版社, 2002.
- [2] 周同喜. 装备保障防卫理论研究[M]. 北京: 解放军出版社, 2002.
- [3] 王宗喜, 徐东. 军事物流学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [4] Lawrence V S, Mark S D. Reliability models for facility location: The expected failure cost case[J]. Transportation Science, 2005, 39(3): 400-416.
- [5] Lawrence V S, Mark S D. Models for reliable supply chain network design[R]. Evanston: Northwestern University, 2006.
- [6] 张伟, 于春风. 联合作战装备一体化综合保障问题研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(2): 21-24.
- [7] 刘啸林. 网络抗毁性研究及其在证券交易网络中的应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [8] 李勇, 吴俊, 谭跃进. 容量均匀分布的物流保障网络级联失效抗毁性[J]. 系统工程学报, 2010, 25(6): 853-860.
- [9] 楚杨杰, 程文龙, 罗嘉, 黄樟灿. 交通网络抗毁性实证研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(26): 203-205.
- [10] 孙丽君. 基于区域经济的区域物流需求分析及实证研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [11] 朱坤萍. 区域物流与区域经济发展的互动机理[J]. 河北学刊, 2007, 27(2): 168-171.
- [12] 杨晗熠. 区域物流系统及轴-辐网络研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [13] 杨光华. 区域物流网络结构的演化机理与优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [14] 况漠. 基于 TEB 演化机制的区域物流系统优化理论与方法研究[D]. 绵阳: 西南交通大学, 2006.
- [15] 肖卓. 云南面向东南亚-南亚区域物流系统优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [16] 王岳峰. 不确定信息环境下区域物流能力柔性规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [17] 杨晓雁. 区域物流系统效应分析[D]. 上海: 上海社会科学院, 2010.
- [18] James L Asher. Regional Freight Model is Applied to the Planning of Regional Networks[J]. Journal of Molecular Liquids, 1993: 123-127.
- [19] Donald J Bowersox. 21st Century Logistics: Making Supply Chain Integration a Reality[R]. Oak Brook, IL: Council of Logistics Management, 1999.

- [20] Eseobedo. Value Chain on the Regional Logistics Planning System[M]. London: Pitman Publishing, 2001.
- [21] Fisher. The Planning of Regional Logistics[J]. Journal of Melbourne University, 2002 102-122.
- [22] Ackermann, Muller. Modeling, Planning and Designing of Logistics Structures of Regional Competence-cell-based Networks with Structure Types[J]. Robotics and Computer. Integrated Manufacturing, 2005:6-14.
- [23] P H Ketikidis. The use of information systems for logistics and supply chain management in South East Europe: Current status and future direction[J]. Omega,2008,36(4):592-599.
- [24] 李春海, 廖立新. 区域物流系统及物流园规划方法体系[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(4): 398-401.
- [25] 汪波, 杨天剑, 赵艳彬. 区域物流发展水平的综合评价[J]. 工业工程, 2005, 8(1): 83-86.
- [26] 张永, 李旭宏, 毛海军. 区域物流基础设施平台规划框架研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(2): 69-73.
- [27] 谈贵军, 等. 一种物流量的权变组合预测方法及应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(2): 105-109.
- [28] 张义龙. 区域物流资源的最佳利用[J]. 社会科学家, 2009, 144(4): 60-63.
- [29] 王岳峰, 刘伟. 区域物流能力柔性规划的内涵、特点与概念模型[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(1): 165-168.
- [30] 王宗喜. 军事物流概论[M]. 北京: 海潮出版社, 1993.
- [31] 蒋宁, 王丰, 王进. 我军军事物流配送保障浅析[J]. 军事物流, 2007, (2): 199-215.
- [32] 罗毅. 军事物流供应链设计与物流模式研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [33] 赵华, 刘洪良, 王高翔. 战时群点式器材保障网络建设构想[J]. 价值工程, 2011, (16): 284.
- [34] 田新月. 基于多式联运的装甲装备器材应急调度优化研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2009.
- [35] 王洪炜. 装甲装备器材供应链优化研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2010.
- [36] 百度百科. <http://www.baike.baidu.com>
- [37] 胡双增, 张明. 物流系统工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [38] M Brandeau, S Chiu. An Overview of Representative Problems in Location Research[J]. Management Science, 1999, 35(3): 645-674.
- [39] Perez J A, Vega J M, Verdegay J L. Fuzzy Location Problems on Networks[J]. Fuzzy sets and systems, 2004, 142(3): 393-405.
- [40] 蔡临宁. 物流系统规划建模与实例分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [41] 张艳霞, 马丽娟. 物流中心选址问题研究现状[J]. 商业研究, 2008, 318(6): 157-159.

- [42] 郇振华. 配送中心选址模型与算法研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [43] Holme P, Kim B J. Attack Vulnerability of Complex Networks[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, 65:56-109.
- [44] 温巧林, 司守奎, 孙玺菁, 许波林. 军事通信网络抗毁性指标函数研究[J]. *系统安全*, 2010, (6): 46-48.
- [45] 王伟. 铁路网抗毁性分析与研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [46] Ellison R J, Linger R C, Longstaff T, Mead N R. Survivable network system analysis: a case study[J]. *IEEE Software*, 1999, 16(4):70-77.
- [47] Louca S, Pitsillides A, Samaras G. On network survivability algorithms based on trellis graph transformations[J]. *Proceeding of the Fourth IEEE Symposium on Computers and Communications(ISCC1999)*, 1999:235-243.
- [48] 谈革新. 复杂网络拓扑层抗毁性测度研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [49] Department of Numerical Analysis and Computer Science at Stockholm University. <http://www.csc.kth.se/viggo/wwwcompendium/node276.html>
- [50] E Ghashghai, R Rardin. Using a hybrid of exact and genetic algorithms to design survivable networks[J]. *Computers & Operations Research*, 2002, (29):53-56.
- [51] P Brostrom, K Holmberg. Multi objective design of survivable IP networks[J]. *Ann Oper Res*, 2006, (147):235-253.
- [52] 刘亭, 张杭. 网络抗毁性综述[J]. *军事通信技术*, 2003, 24(4): 19-23.
- [53] Clausen J, Hansen J, Larsen J. Disruption management operations research between planning and execution[J]. *OR/MS*, 2001, 28 (5) : 40-43.
- [54] Gang Yu, Xiangtong Qi. *Disruption Management Framework, Models and Applications*[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., 2004.
- [55] 陈安, 李铭禄. 干扰管理、危机管理和干扰管理概念辨析[J]. *干扰管理管理汇刊*, 2006, 1(1): 8-9.
- [56] Yu G, Michael Arguello, Gao S, Sandra M McCowan, Anna White. A new area for crew recovery at continental airlines[J]. *Interfaces*, 2003, 33(1) : 5-22.
- [57] Wu C L. Inherent delays and operational reliability of airline schedules[J]. *Elsevier Science, Journal of Air Transport Management*, 2005, (11) : 273-282.
- [58] Rosenberger J M, Johnson E L, Nemhauser G L. Rerouting Aircraft for Airline Recovery[J]. *Transportation Science*, 2003, (37): 408-421.
- [59] Niklas Kohl, Allan Larsen, Jesper Larsen, Alex Ross, Sergey Tiourine. Airline Disruption Management-Perspectives, experiences and outlook[J]. *Journal of Air Transport Management*,

- 2007, 13(03): 149-162.
- [60] Liu T K, Jeng C R, Chang Y H. Disruption management of an inequality-based multi-fleet airline schedule by a multi-objective genetic algorithm[J]. *Transport Planning and Technology*, 2008, (31): 613-639.
- [61] M. Reza Abdi, Sanjay Sharma. Information system for flight disruption management[J]. *International Journal of Information Management*, 2008, (28): 136-144.
- [62] Walker, Cameron G, Snowdon, Jody N, Ryan, David M. Simultaneous disruption recovery of a train timetable and crew roster in real time[J]. *Elsevier Science, Computers & Operations Research*, 2005, (32): 2077-2094.
- [63] Julie Jespersen-Groth, Daniel Potthoff, Jens Clausen, Dennis Huisman, Leo Kroon. Disruption Management in Passenger Railway Transportation[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2009, (1): 399-421.
- [64] Portougal, Victora, Trietsch, Dan. Setting due dates in a stochastic single machine environment[J]. *Elsevier Science, Computers & Operations Research*, 2006, 33(6): 1681-1694.
- [65] Yang J, Yu G. On the Robust Single Machine Scheduling Problem[J]. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2002, 6(1):17-33.
- [66] Lee C Y, Leung Y T, Yu G. Two Machine Scheduling under Disruptions with Transportation Considerations[J]. *Journal of Scheduling*, 2006, (9): 35-48.
- [67] Chuan-Li Zhao, Heng-Yong Tang. Scheduling deteriorating jobs under disruption[J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, (2): 294-299.
- [68] 于辉, 陈剑, 于刚. 协调供应链如何应对突发事件[J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 25(7): 9-16.
- [69] Xia Y, Yang M, Golany B, Gilbert S, Yu G. Realtime disruption management in two-stage production and inventory system[J]. *IIE Transactions*, 2004, 36(2):111-125.
- [70] 陈敬贤, 施国洪, 马汉武, 程发新. 受需求风险干扰的供应链系统最优控制策略[J]. *系统工程*, 2008, 26(8): 22-26.
- [71] Xiao Tiaojun, Qi Xiangtong, Yu Gang. Coordination of supply chain after demand disruptions when retailers complete[J]. *International Journal of Production Economics*, 2007, 109(3):162-179.
- [72] Huang Chongchao, Yu Gang, Wang Song, Wang Xianjia. Disruption Management for Supply Chain Coordination with Exponential Demand Function[J]. *Acta Mathematica Scientia*, 2006, 26B(4): 655-669.
- [73] Van de Vonder, Stijn, Demeulemeester, Erik, Herroelen, Willy, Leus, Roel. The use of buffers in project management: The trade off between stability and makespan[J]. *Elsevier Science, Int. J.*

- Production Economics, 2005, 97: 227-240.
- [74] Zhu G, Bard J F, Yu G. Disruption Management for Resource-constraint Project scheduling[J]. Journal of the Operational Research Society, 2005, 56(4):365-381.
- [75] Willy Herroelen, Roel Leus. Project Scheduling under uncertainty: Survey and Research Potentials[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 165(2):289-306.
- [76] Howick S, Eden C. The impact of disruption and delay when compressing large Projects: going for incentives[J]. Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(4):26-34.
- [77] Junchao Xiao, Leon J, Osterweil, Qing Wang, Mingshu Li. Dynamic Resource Scheduling in Disruption-Prone Software Development Environments[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2010, (1): 107-122.
- [78] A C A Cauvin, A F A Ferrarini, E T E Tranvouez. Disruption management in distributed enterprises: A multi-agent modelling and simulation of cooperative recovery behaviours[J]. International Journal of Production Economics, 2009, (122): 429-439.
- [79] 胡祥培, 张漪, 丁秋雷, 王旭坪. 干扰管理模型及其算法的研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2008, (10): 40-46.
- [80] 胡祥培, 丁秋雷, 张漪, 王旭坪. 干扰管理研究评述[J]. 管理科学, 2007, 20(2): 2-8.
- [81] 常沛. LTE 系统中的干扰管理技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [82] 王旭坪. 物流配送调度的干扰管理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [83] Hane C A, Barnhart C, Johns on E L, et al. The fleet assignment problem: Solving a large-scale integer program[J]. Mathematical Programming, 1995, 70 (2): 211-232.
- [84] Ahmad I Jarrah, Jon Goodstein, Ram Narasimhan. An efficient airline re-fleeting model for the incremental modification of planned fleet assignments[J]. Transportation Science, 2000, 34 (4):349 -363.
- [85] 刘英. 应急状态下航班运行的干扰管理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [86] 丁慧, 胡庆文. 实时决策支持系统中的最短路修复问题[J]. 艇船电子工程, 2003, 22(1): 10-14.
- [87] Howick S, Eden C. The impact of disruption and delay when compressing large Projects: going for incentives[J]. Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(4):26-34.
- [88] 高虹霓, 杨建军, 曹泽阳. 提高大型交通网络最短路搜索效率研究[J]. 空军工程大学学报, 2003, 4(1): 54-57.
- [89] 王岑, 高成修. 投资决策中的 0-1 背包问题的扰动修复[J]. 武汉大学学报 (理学版), 2004, 50(5): 542-546.
- [90] Zhu G, Bard J F, Yu G. Disruption Management for Large-Scale Project Problems[J]. Journal of

- the Operational Research Society, 2005, 56(4):365-381.
- [91] Li J Q, Borenstein D, Mirehandani P B. A decision support system for the single-depot vehicle rescheduling problem[J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(4): 1008-1032.
- [92] 王雅楠. 物流供应系统需求量变动的干扰管理模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [93] 胡祥培, 孙丽君, 王雅楠. 物流供应系统干扰管理模型研究[J]. 管理科学学报, 2011, 14(1): 50-58.
- [94] Teodorovic D, Guberinic S. Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation[J]. European Journal of operational Research, 1984, 15:178-182.
- [95] Gou Wei, Gang Yu, Mark Song. Optimization model and algorithm for crew management during airline irregular operations[J]. Journal of Combinatorial optimization, 1997, (1):305-321.
- [96] Kouvelis P, Yu G. Robust discrete optimization and its applications[J]. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [97] Kouvelis P, Daniels R L, Vairaktarakis G. Robust scheduling of a two-machine flow shop with uncertain Processing times[J]. IIE Transactions on Scheduling and Logistics, 2000, 32:421-432.
- [98] 杨磊, 马俊, 高成修. TSP 的扰动恢复问题及其轮换算法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2003, 49(3): 301-304.
- [99] Andersson T. The Flight Perturbation Problem-operational Aircraft Scheduling[D]. Sweden:Linköping University of Technology, Campus Norrköping, 2001.
- [100] Stutzle T. Iterated Local Search for the Quadratic Assignment Problem[R]. Technical Report. Technische Hochschule Darmstadt, 1999.
- [101] Mladenovic N, Hansen P. Variable neighborhood search[J]. Computers & Operations Research, 1997, 24:1097-1100.
- [102] Michael Love, Kim Riis Sorensen, Jesper Larsen, Jens Clausen. Disruption Management for an Airline-Rescheduling of Aircraft[J]. Applications of Evolutionary Computing, 2002 2279(3):315-324.
- [103] 李勇. 物流保障网络级联失效抗毁性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [104] 王文峰. 装备保障网络优化设计问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [105] 金丽亚. 应急装备器材供应干扰管理决策研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2012.
- [106] 王铁宁, 徐胜良, 梁波. 通装备件多级联合保障模式研究[J]. 中国物流与采购, 2012, (24): 43-44.
- [107] 张建勇, 郭耀煌. 一种多式联运网络的最优分配模式研究[J]. 铁道学报, 2002, 24(004): 114-116.

- [108] 徐胜良. 基于多级联合保障的装备备件库存控制仿真与优化研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2012.
- [109] Bonissone P P, Decker K S. Selecting uncertainty calculi and granularity and experiment in trading-off precision and complexity[A]. Kanal L H, Lemmer J F(Eds). Uncertainty in Artificial Intelligence[M]. Amsterdam, North-Holland, 2000.
- [110] Herrera F, Martinet L. Representation models for aggregation linguistic information: issues and analysis[R]. Aggregation Operators: New Trends and Applications, T Calvo, G Mayor, R Mesiar. New York: Physica-Verl, 2002,244-259.
- [111] E. Herrera-Viedma, F. Herrera, L. Martinet, J.C. Herrera, A.G. Lopez. Incorporating filtering techniques in a fuzzy linguistic multi-agent model for information gathering on the web[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 148: 61-83.
- [112] 徐泽水. 纯语言多属性群决策方法研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(7): 778-781.
- [113] Z.S. Xu, Q.L. Da. An overview of operators for aggregating information[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2003, 18(9):953-969.
- [114] 王应明. 应用离差最大化方法进行多指标决策与排序[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 20(7): 24-26.
- [115] 王亚利. 解几类优化问题的遗传算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [116] Jeroslow R G. The polynomial hierarchy and a simple model for competitive analysis[J]. Mathematical Programming, 1985,32:146-164.
- [117] Candler W, Townsely R. A linear two-level programming problem[J]. Computers and Operations Research, 1982,9:59-76.
- [118] Bialas W F, Karwan M H. On two-level optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1982,27(1):211-214.
- [119] Bialas W F, Karwan M H. Two-level linear programming[J]. Management Science,1984, 30(8):1004-1020.
- [120] Wen U P. The K-Best algorithm for multilevel programming[J]. Technical Report, Department of Operations Research, 1981.
- [121] 刘红英, 刘三阳, 周永生. 两层广义线性规划[J]. 系统工程学报, 2000, 15(2): 131-135.
- [122] Fortuny Amat J, McCarl B. A representation and economic interpretation of a two-level programming problem[J]. Journal of the Operational Research Society, 1981,32(9):783-792.
- [123] Bard J F, Falk J E. An explicit solution to the multi-level programming problem[J]. Computers and Operations Research, 1982,9(1):77-100.

- [124] Bard J F, Moore J T. A brach and bound algorithm for the bilevel programming problem[J]. SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing, 1990,11:281-292.
- [125] Aiyoshi E, Shizu K. A solution method for the static constrained Stackelberg problem via penalty method[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1984,29(12):1111-1114.
- [126] Shimizu K, Lu M. A global optimization method for the Stackelberg problem with convex functions via problem transformations and concave programming[J]. IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1995,25(12):1635-1640.
- [127] 贾富臣. 结合全局最优策略的双层线性规划算法[J]. 北京理工大学学报, 1995, (15): 6-12.
- [128] Anandalingam G, White D J. A solution method for the linear Stackelberg problem using penalty function[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1990,35(10):1170-1173.
- [129] White D J, Anandalingam G. A penalty function approach for solving bilevel linear programs[J]. Journal of Global Optimization, 1993,3:397-419.
- [130] Taniguchi T, Qawa T. An algorithm for solving two-level convex optimization problem[J]. System Science, 1984,15:163-174.
- [131] Kolstad C D, Lasdon L S. Derivative evaluation and computational experience with large bilevel mathematical programs[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1990, 65:485-499.
- [132] Savard G, Gauvin J. The steepest descent direction for the nonlinear bilevel programming problem[J]. Operations Research Letters, 1994,15:275-282.
- [133] Bialas W F, Fikri M H, Shaw J. A parametric complementary pivot approach for two-level linear programming[J]. Technical Report 80-2, Operations Research Program, 1980.
- [134] Judice J J, Faustino A M. A sequential LCP method for bilevel linear programming[J]. Annals of Operations Research, 1992,34:89-106.
- [135] Onal H. A modified simplex approach for solving bilevel linear programming problems[J]. European Journal of Operation Research, 1993,67(1):126-135.
- [136] Wen U P, Huang A D. Simple tabu search method to solve the mixed-integer linear bilevel programming problem[J]. European Journal of Operation Research, 1996,88(3):563-571.
- [137] Gendreau M, Marcotte P, Savard G. Hybrid tabu-ascent algorithm for the linear bilevel programming problem[J]. Journal of Global Optimization, 1996,8(3):217-233.
- [138] 谈焱, 仲伟俊, 徐南荣. 基于遗传算法的一类资源分配两层规划问题求解[J]. 东南大学学报, 1999, 29(4): 12-16.
- [139] Jeroslow R G. The hierarchy and a competitive model for analysis[J]. Mathematical Programming, 1985,32:146-164.

-
- [140] Glover F. Tabu Search, Part I[J]. ORSA Journal on Computing, 1989, 1(3):190-206.
- [141] J Browne. Production Activity Control-a Key Aspect of production Control[J]. Int. J. Prod. Res,1988,26(3):425-427.
- [142] Ellson B, Fisher D A, Lnger R C. A survivable network systems: an emerging discipline, CMU/SEI-97-TR-013[R]. Pittsburgh: Camegie Mellon University, 1997.
- [143] 明亮, 王东霞, 张鲁峰, 王春雷. 网络抗毁性测度研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1850-1852.
- [144] Freeman L C. A set of measures of Centrality Based on Betweenness[J]. Sociometry, 1977, 234(21):223-243.
- [145] 吴俊. 复杂网络拓扑结构抗毁性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [146] 潘淑文. 加权复杂网络抗毁性及其故障恢复技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [147] 齐玉东. 海军航空兵机动转场决策模型研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2012.